

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.

A robot with controlled tool tracking displacement.Patent Number: ☒ EP0349291, A3, B1Publication
date: 1990-01-03

Inventor(s): HAYASHI CHISAO C O K K TOYOTA; KUNO TOSHITAKA C O K K TOYOTA; MORIBE HIROSHI C O K K TOYOTA; ISHIGURO YASUO; KATO YOSHITO; KOIDE MITSUO C O K K TOYOTA CH; NAKANO MASARU C O K K TOYOTA C

Applicant(s): TOYOTA MOTOR CO LTD (JP)

Requested
Patent: DE68920212TApplication
Number: EP19890306554 19890627Priority Number
(s): JP19880162933 19880630IPC
Classification: B25J9/18EC
Classification: B25J13/08F, G05B19/425Equivalents: DE68920212D, ☐ JP2015956, JP2676793B2, ☐ US4967127Cited patent(s): EP0129245

Abstract

A tracking control robot controls its arm end, which holds a tool, to track a taught path so that a reaction force between a workpiece and the tool remains constant. An ideal state for the arm end is determined from the present state of the arm end and the difference between the actual reaction force and a predetermined target force. Then, this ideal state is compared with a reference state of the arm end on the taught path to obtain a target position and a target attitude of the arm end. Since a target position is always determined independently of the last target position, no position error due to time delay affects a new target position even when the next target position is generated before the tool reaches the last target position. Thus, the robot is quick, responsive, and accurate when tracking at a constant operation speed.

Data supplied from the esp@cenet database - I2



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der
europäischen Patentschrift

⑤1 Int. Cl.⁶:
B 25 J 9/18

⑧7 EP 0 349 291 B1

⑩ DE 689 20 212 T 2

- ②1 Deutsches Aktenzeichen: 689 20 212.1
- ⑧6 Europäisches Aktenzeichen: 89 306 554.0
- ⑧6 Europäischer Anmeldetag: 27. 6. 89
- ⑧7 Erstveröffentlichung durch das EPA: 3. 1. 90
- ⑧7 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 28. 12. 94
- ④7 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 11. 5. 95

DE 689 20 212 T 2

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1
30.06.88 JP 162933/88

⑦3 Patentinhaber:
Toyota Jidosha K.K., Toyota, Aichi, JP

⑦4 Vertreter:
Tiedtke, H., Dipl.-Ing.; Bühling, G., Dipl.-Chem.;
Kinne, R., Dipl.-Ing.; Pellmann, H., Dipl.-Ing.; Grams,
K., Dipl.-Ing.; Link, A., Dipl.-Biol. Dr., Pat.-Anwälte,
80336 München

⑧4 Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB, SE

⑦2 Erfinder:
Ishiguro, Yasuo, Toyota-shi Aichi-ken, JP; Kato,
Yoshito, Toyota-shi Aichi-ken, JP; Hayashi, Chisao
c/o K.K. Toyota Chuo Kenkyusho, Aichi-gun
Aichi-ken, JP; Nakano, Masaru C/O K.K. Toyota
Chuo Kenkyusho, Aichi-gun Aichi-ken, JP; Koide,
Mitsuo C/O K.K. Toyota Chuo Kenkyusho, Aichi-gun
Aichi-ken, JP; Moribe, Hiroshi C/O K.K. Toyota Chuo
Kenkyusho, Aichi-gun Aichi-ken, JP; Kuno,
Toshitaka C/O K.K. Toyota Chuo Kenkyusho,
Aichi-gun Aichi-ken, JP

⑤4 Roboter mit Werkzeugsteuerung für Verschiebungsfolge.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 689 20 212 T 2

Deutschsprachige Übersetzung der Beschreibung
der Europäischen Patentanmeldung Nr. 89 306 554.0-2302
des Europäischen Patents Nr. 0 349 291

Diese Erfindung bezieht sich auf einen Verschiebungs-
Steuerungsroboter bzw. einen Trackingsteuerungsroboter zum
Steuern der Bewegung eines Werkzeugs, das am Ende eines Robo-
terarms befestigt ist, um einem Vorgabepfad zu folgen, wäh-
rend eine gewünschte Kraft zwischen dem Werkzeug und einem
5 Werkstück aufrechterhalten wird.

Stand der Technik

Für Bearbeitungsvorgänge einschließlich Entgraten, Preß-
polieren, Abgraten und Polierlappen wurde von einem Indu-
strieroboter gefordert, eine Rückwirkungskraft zu steuern,
10 die von einem zu bearbeitendem Objekt (im folgenden Werk-
stück) und einem Werkzeug, wie z.B. einem Schleifstein, das
am Ende des Roboterarms befestigt ist, ausgeübt wird.

Ein solcher Roboter wurde im Bericht "Force Control Sy-
stem of a Light-weight Multi-articulated Robot Arms" No.3209
15 des dritten Symposiums der Robotics Society of Japan, das am
28, 29 und 30 November 1985 abgehalten wurde, vorgestellt.
Entsprechend diesem Bericht hat der Roboter zwischen seinem
Armende und einem Werkzeug einen Verschiebung-in-Kraft-Um-
wandlungsmechanismus mit einer vorbestimmten Beziehung zwi-
20 schen einer Kraft, die in eine vorbestimmte Axialrichtung
ausgeübt wird, und einer Verschiebung in die gleiche Axial-
richtung. Der Roboter hat ebenfalls einen Kraftsensor zum Er-
fassen einer Rückwirkungskraft, die durch ein Werkstück auf
das Werkzeug ausgeübt wird. Der Roboterarm wird mit diesem
25 Kraftsensor genauestens gesteuert, um die erfaßte Rückwir-

kungskraft auf einen vorbestimmten Wert zu regulieren.

Der vorstehend genannte Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanismus, der ebenfalls als Nachgiebigkeitsmechanismus bezeichnet wird, weist ein elastisches Element auf, wie z.B. eine Feder, einen Gummiabschnitt usw. Durch das Regulieren der Verschiebung in eine vorbestimmte Axialrichtung kann die durch das Werkzeug auf das Werkstück ausgeübte Kraft gesteuert werden.

Bei diesem Roboter nach dem Stand der Technik wird das Armende gesteuert, um einem Standardpfad zu folgen, der durch Positionsdaten bestimmt ist, die während eines vorhergehenden Vorgabeprozesses gespeichert werden. Während des Folgens des Pfades erfaßt der im Armende installierte Kraftsensor die vom Werkstück zum Werkzeug übertragene Rückwirkungskraft.

Durch das Anwenden der erfaßten Rückwirkungskraft auf eine Bewegungsgleichung eines materiellen Teilchens wird eine Positionsabweichung Δx_i (die Differenz zwischen der Istposition des Armendes und einer Position des Armendes, in der eine gewünschte Rückwirkungskraft erhalten werden kann) berechnet. Nachfolgend wird eine nächste Sollposition x_i für das Armende berechnet, indem die Positionsabweichung Δx_i zur letzten Sollposition x_{i-1} addiert wird. Dann wird der Arm in die berechnete Sollposition bewegt.

Durch das Wiederholen dieses Vorgangs wird die vom Werkzeug auf das Werkstück ausgeübte Kraft auf einem konstanten Wert gehalten.

Gemäß Vorbeschreibung wird die Sollposition x_i entsprechend der folgenden Gleichung berechnet:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i$$

Im allgemeinen ist jedoch die Position, in der die Rückwirkungskraft vom Kraftsensor eingegeben wird, nicht die gleiche wie die letzte Sollposition x_{i-1} . Diese Differenz wird verursacht, da das Korrektursignal für die Position und die Lage des Armendes sich auf die durch den Kraftsensor erfaßte Rückwirkungskraft stützend in Intervallen von einigen zehn Millisekunden erzeugt wird, während es sogar einiger hundert Millisekunden bedarf, um das Armende zur Sollposition und Sollage zu bewegen. Als Ergebnis wird ein weiteres Korrektursignal für die Position und die Lage des Arms erzeugt, bevor der Arm die Sollposition und Sollage erreicht.

Diese Situation ist in den Fig. 14A und 14B gezeigt, die die Bewegung des Armendes des Roboters nach dem Stand der Technik darstellen, während ein Werkstück mit einem unebenen Oberflächenprofil fertigbearbeitet wird. Die Vollinie in den Zeichnungen zeigt die Istbewegung des Roboterarmendes an, die gestrichelte Linie zeigt den Sollwert der Bewegung des Armendes an und die Strichpunktlinie zeigt die Idealposition des Armendes mit einer vorbestimmten Rückwirkungskraft an. Das Armende bewegt sich in der Zeichnung von links nach rechts, während das Werkstück bearbeitet wird.

In Fig. 14A wird die Verschiebung des Nachgiebigkeitsmechanismus, die dem Output des Kraftsensors entspricht, als Positionsabweichung Δx ohne Abwandlung verwendet. In diesem Fall bewegt sich das Armende wie folgt.

Bis zum Erreichen des Punktes $N=2$ durch das Armende ist der Abstand zwischen dem Armende und dem Werkstück konstant, so daß die Rückwirkungskraft des Werkstücks gegen das Werkzeug ebenfalls konstant ist.

Nachdem das Armende den Punkt $N=2$ erreicht hat, übersteigt der Abstand zwischen dem Armende und dem Werkstück einen vorbestimmten Wert; die vom Werkzeug auf das Werkstück

ausgeübte Kraft verringert sich. Um diesen Verlust auszugleichen, wird der Sollwert des nächsten Punktes ($N=3$) eingestellt, indem die Differenz zwischen der Idealposition und der Istposition des Armendes zum Sollwert des letzten Punktes ($N=2$) addiert wird.

Zum Zeitpunkt $N=3$ übersteigt der Abstand zwischen dem Armende und dem Werkstück noch einen voreingestellten Wert, so daß der Sollwert des nächsten Punktes ($N=4$) korrigiert werden muß. Im Punkt $N=3$ hat das Armende jedoch noch nicht den Sollpunkt erreicht. Demzufolge wird die nicht regulierte Positionsabweichung zum Sollwert des nächsten Punktes ($N=4$) addiert. Die nicht regulierten Positionsabweichungen werden in den folgenden Punkten aufeinanderfolgend gesammelt. Als Ergebnis verursacht das Steuerungssystem ein Überschwingen und eine Schwingung, wie es in Fig. 14A gezeigt ist.

Um die vorstehend genannten Probleme zu lösen, ist es möglich, eine Positionsabweichung zu verwenden, die bestimmt wird, indem ein Koeffizient, der kleiner als 1 ist (z.B. $1/3$ oder $1/4$) und die Verschiebung des Nachgiebigkeitsmechanismus, die dem Kraftsensor-Output entspricht, multipliziert werden.

In diesem Fall wird jedoch eine längere Zeit benötigt, um einen gewünschten Wert für die vom Werkzeug auf das Werkstück ausgeübte Kraft zu erreichen, auch wenn ein Überschwingen niemals auftritt. In Fig. 14B werden zum Beispiel zehn Prozeßschritte benötigt.

Während sich die durch das Werkzeug auf das Werkstück ausgeübte Kraft außerhalb des gewünschten Wertes befindet, verschlechtert sich die Bearbeitungsgenauigkeit.

Um das Problem zu lösen, das durch die Zeitverzögerung zwischen der Zeit, wenn der Sollwert ausgegeben wird und wenn

der Arm tatsächlich den Sollwert erreicht, verursacht wird, ist es möglich, das nächste Korrektursignal auszugeben, nachdem der Arm den Sollwert erreicht hat.

5 Da nach dem Output des Sollwertes einige hundert Millisekunden benötigt werden, um gemäß Vorbeschreibung den Arm in die Sollposition zu bringen, benötigt in diesem Fall jeder Steuerungsschritt ebenfalls einige hundert Millisekunden. Demzufolge wird die Bearbeitungsgeschwindigkeit beträchtlich verringert. Dieses Verfahren ist daher nicht verwendbar.

10 Der vorstehend genannte herkömmliche Roboter folgt dem Standardpfad sich auf die Vorgabedaten stützend. Wenn eine beträchtlich Korrektur für die Position des Roboterarms erforderlich ist, kann der Arm vom Standardpfad deutlich abweichen, da die Position unabhängig von den Vorgabedaten korrigiert wird.
15

Zusammenfassung der Erfindung

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, die vorstehend genannten Probleme zu lösen und einen Trackingsteuerungsroboter vorzusehen, der Vorgabedaten fest-
20 hält, um eine genaue Sollposition zu bestimmen, so daß eine gewünschte Rückwirkungskraft, die durch ein Werkstück auf ein Werkzeug ausgeübt wird, erhalten werden kann.

Eine andere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, einen Trackingsteuerungsroboter vorzusehen, der die
25 durch das Werkstück auf das Werkzeug ausgeübte Rückwirkungskraft in Echtzeit ohne Verringerung der Roboterbetriebsgeschwindigkeit reguliert.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht im Vorsehen eines Trackingsteuerungsroboters mit verbesserter
30 Ansprechempfindlichkeit und Genauigkeit zum Steuern der Posi-

tion und der Lage des Werkzeugs.

Zur Lösung dieser und anderer Aufgaben sieht die vorliegende Erfindung einen Trackingsteuerungsroboter entsprechend Patentanspruch 1 vor.

5 Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist ein Blockdiagramm, das eine Grundstruktur der vorliegenden Erfindung zeigt.

Fig. 2 ist eine perspektivische Ansicht eines Roboters und eines Steuerungssystems als ein Ausführungsbeispiel der
10 vorliegenden Erfindung.

Die Fig. 3A, 3B und 3C sind eine Draufsicht, eine Vorderansicht bzw. eine Ansicht von links eines Arbeitskörpers des Roboters.

Fig. 4 ist eine perspektivische Ansicht, die ein Roboterarmende zeigt.
15

Fig. 5 ist ein Blockdiagramm, das die Struktur einer Robotersteuerungseinrichtung zeigt.

Fig. 6 ist ein Blockdiagramm, das den Regelungsabschnitt der Robotersteuerungseinrichtung zeigt.

Fig. 7 ist eine Darstellung, die die Positionsbeziehung zwischen verschiedenen Kontrollpunkten anzeigt.
20

Fig. 8 ist eine Darstellung von Kraftdaten, die durch einen Kraftsensor erfaßt werden.

Fig. 9 ist eine Darstellung, die die Erfassung einer Änderung der Rückwirkungskraft zeigt.
25

Fig. 10 ist ein Fließdiagramm, das Steuerungsvorgänge anzeigt, die in einer ersten CPU ausgeführt werden.

Fig. 11 ist ein Fließdiagramm, das Steuerungsvorgänge anzeigt, die in einer zweiten CPU ausgeführt werden.

5 Fig. 12 ist eine Darstellung, die die Bewegung des Roboterarmes des vorliegenden Ausführungsbeispiels zeigt.

Fig. 13 ist eine perspektivische Ansicht, die ein weiteres Beispiel eines Nachgiebigkeitsmechanismus zeigt.

10 Die Fig. 14A und B sind Darstellungen der Bewegung des Armes der Roboter nach dem Stand der Technik.

Detaillierte Beschreibung des bevorzugten Ausführungsbeispiels

15 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen sechsachsigen Gelenkroboter zum Schleifen oder Polieren eines Werkstücks unter Verwendung eines Schleifsteins als ein Werkzeug, während zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug eine konstante Rückwirkungskraft aufrechterhalten wird.

20 Die Struktur des Roboters 10 ist in Fig. 2 gezeigt. Der Roboter 10 ist mit einer Robotersteuerungseinrichtung 12 zum Steuern des Betriebes des Roboters 10, einem Vorgabefach 14 an der Robotersteuerungseinrichtung 12, das einer Bedienungsperson gestattet, dem Roboter 10 im voraus vorzugeben, wie eine Aufgabe auszuführen ist, einem Arbeitskörper 16 mit sechs Achsen, der in Übereinstimmung mit von der Robotersteuerungseinrichtung 12 ausgesendeten Signalen betätigt wird, einem Werkzeug 20 und einem Kraftsensor 22 zum Erfassen der Rückwirkungskraft eines Werkstücks W gegen das Werkzeug 20, wobei beide an einem Nachgiebigkeitsmechanismus 19 an einem Armende 18 am Arbeitskörper 16 befestigt sind, und

25

einer Sensorsteuerungseinrichtung 24 zum Verarbeiten des vom Kraftsensor 22 ausgesendeten Signals ausgerüstet. Außerdem weist die Robotersteuerungseinrichtung 12 eine Datenstation T zur Eingabe und Ausgabe und einen Drucker P auf.

5 Detaillierte Erläuterungen zu jedem Abschnitt des Roboters 10 werden dargelegt. Als erstes wird der Arbeitskörper 16 des Roboters 10 unter Bezugnahme auf die Fig. 3A, 3B bzw. 3C erläutert, die eine Draufsicht, eine Vorderansicht und eine Ansicht von links des Arbeitskörpers 16 zeigen. Der Arbeitskörper 16 hat sechs Drehachsen. Die erste, die zweite und die dritte Achse steuern die Position des Armendes 18 in bezug auf das Werkstück W; die vierte, die fünfte und die sechste Achse steuern die Lage des Armendes 18 in Beziehung zum Werkstück W.

15 Jede Achse hat einen Motor, eine Bremse zum Stoppen der Drehung und einen Kodierer zum Erfassen der Rotationsgeschwindigkeit der Achse: die erste Achse weist einen ersten Motor 30, eine erste Bremse 32 und einen ersten Kodierer 34 auf, die zweite Achse weist einen Motor 40, eine zweite Bremse 42 und einen zweiten Kodierer 44 auf, die dritte Achse weist einen dritten Motor 50, eine dritte Bremse 52 und einen dritten Kodierer 54 auf, die vierte Achse hat einen vierten Motor 60, eine vierte Bremse 62 und einen vierten Kodierer 64, die fünfte Achse weist einen fünften Motor 70, eine fünfte Bremse 72 und einen fünften Kodierer 74 auf und die sechste Achse weist einen sechsten Motor 80, eine sechste Bremse 82 und einen sechsten Kodierer 84 auf.

30 Die Drehungen um die zweite Achse und die dritte Achse durch die Motoren 40 und 50 werden über Kugelumlaufspindelvorschübe 90 und 92 in lineare Bewegungen umgewandelt; die linearen Bewegungen werden durch Parallelverbindungen in Drehungen um die Achsen umgewandelt. Die Drehungen um die anderen Achsen werden über Verdrehrohre, Untersetzungsgetriebe,

Schraubgetriebe und andere Übertragungselemente durch jeweilige Motoren ausgelöst.

In Fig. 4 hat das Armende 18 einen Schleifstein 20, einen Motor 100, einen Nachgiebigkeitsmechanismus 19 und einen Kraftsensor 22. Der Schleifstein 20 ist ein Werkzeug zum Bearbeiten des Werkstücks W. Der Motor 100 ist über ein Getriebe (nicht gezeigt) mit dem Schleifstein 20 verbunden, um den Schleifstein 20 zu drehen. Der Nachgiebigkeitsmechanismus 19 besteht aus einer Feder 102 und Dämpfungsvorrichtungen 104 und gleitet mit Rückwirkungskräften nur in die in Fig. 4 gezeigte Verschiebungsrichtungen. Der Kraftsensor 22 ist zwischen dem Nachgiebigkeitsmechanismus 19 und dem Armende 18 montiert, um die durch das Werkstück W auf den Schleifstein 20 ausgeübte Rückwirkungskraft zu erfassen. Das Verhältnis zwischen der Verschiebung des Nachgiebigkeitsmechanismus 19 und der Kraft wird im voraus bestimmt.

Der Kraftsensor 22 verwendet in diesem Ausführungsbeispiel ein Dehnungsmeßgerät zum Erfassen von Kräften in drei Achsrichtungen und von Drehmomenten um die drei Achsen herum, die aus einer Achse in Verschiebungsrichtung des Nachgiebigkeitsmechanismus 19 und zwei Achsen bestehen, die zur Verschiebungsachse senkrecht verlaufen und zueinander ebenfalls senkrecht verlaufen.

Die Kraftdaten F_{sen} (KH1), die durch den Kraftsensor 22 erfaßt werden, stellen die Kraft und das Moment entlang jeder Achse in einem Sensorkoordinatensystem 0-Xs-Ys-Zs mit dem Ursprung 0 an der Position des Kraftsensors 22 dar. Die Kraftdaten werden durch den folgenden sechsdimensionalen Vektor ausgedrückt:

$F_{sen} = (F_{xs}, F_{ys}, F_{zs}, M_{Nxs}, M_{Nys}, M_{Nzs})^T$, wobei T eine transponierte Matrix anzeigt, F Kraft bedeutet, MN Moment bedeutet und xs, ys, zs die Sensorachsen sind.

In diesem Ausführungsbeispiel entspricht die zs-Achse des Sensorkoordinatensystems der Verschiebungsachse des Nachgiebigkeitsmechanismus 19.

5 Als nächstes wird die Struktur der Robotersteuerungseinrichtung 12 dargelegt, die den sechssachsigen Arbeitskörper 16 steuert und ebenfalls als ein Vorgabesystem für den Roboter 10 arbeitet.

Die Robotersteuerungseinrichtung 12, die in Fig. 5 graphisch dargestellt ist, ist ein Mikrorechner, der eine erste
10 CPU 300, eine zweite CPU 301, einen ROM 302, einen RAM 304 und einen Sicherungs-RAM 306 aufweist, die bekannt sind und über einen Bus 308 mit Ein-Ausgabe-Anschlüssen verbunden sind.

Ein-Ausgabe-Anschlüsse, die mit der ersten CPU 300 und
15 der zweiten CPU 301 als Hauptkomponenten der Robotersteuerungseinrichtung 12 zusammenwirken, weisen auf: eine Blasen-speicher-Schnittstelle 312 für eine Blasen-speicher 310, einen Datenstation-Ein-Ausgabe-Anschluß 314 für eine Datenstation T, die eine Kathodenstrahlröhren-Anzeige und eine Tastatur
20 hat, einen Drucker-Ausgabe-Anschluß 316 für einen Drucker P, einen Vorgabefach-Eingabe-Anschluß 318 für das Vorgabefach 14, einen Sensor-Eingabe-Anschluß 230 zum Aufnehmen elektrischer Signale, die vom Kraftsensor 22 über eine Sensorsteuerungseinrichtung 24 ausgesendet wurden, und zum Erzeugen
25 eines Interrupts in der zweiten CPU 301 und Servokreise 320, 322, 324, 326, 328 bzw. 330 für die erste bis sechste Achse.

Jeder Servokreis 320 bis 330 ist ein intelligenter Kreis mit eigener CPU. Wenn die Sollpositionsdaten und die Sollagedaten für den Schleifstein 20 von der ersten CPU 300 über den
30 Bus 308 geschickt werden, wird der Stellbetrag für die einzelnen sechs Achsen von den Kodierern 34, 44, 54, 64, 74 und 84 eingegeben. Sich auf diese Stellbeträge stützend werden

der erste bis sechste Motor 30, 40, 50, 60, 70 und 80 über die jeweiligen Treiber 332, 334, 336, 338, 340 und 342 angetrieben. Dann wird die Spitze des Schleifsteins 20 in Sollposition und Sollage gebracht. Darüber hinaus treiben die ersten bis sechsten Servokreise 320, 322, 324, 326, 328 bzw. 330 die erste bis sechste Bremse 32, 42, 52, 62, 72 und 82 an, so daß, wenn die Umstände es erforderlich machen, verhindert wird, daß der Arm durch sein Eigengewicht betätigt wird oder sich herabbewegt, wenn die Stromversorgung für die Servokreise 320 bis 330 oder für die Motoren 30, 40, 50, 60, 70 und 80 für einen Nothalt ausgeschaltet wird.

Der Betrieb der Robotersteuerungseinrichtung 12 wird im Anschluß beschrieben. Das Regelungssystem der Robotersteuerungseinrichtung 12 besteht hauptsächlich aus zwei Abschnitten, d.h. der ersten und der zweiten CPU 300 und 301, wie es in Fig. 6 gezeigt ist. Die erste CPU 300 sendet Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$, die durch Interpolierung der zuvor vorgegebenen Daten erhalten werden, zur zweiten CPU 301. Dann nimmt die erste CPU 300 einen Anfangssollwert $PTmod(KH1)$ auf, der durch einen Korrekturbetrag modifiziert ist. Sich auf diesen Anfangssollwert $PTmod(KH1)$ stützend wird ein Endsollwert $\Theta_{host}(KH1)$ für jede Achse berechnet und zu jedem Servokreis gesendet, der der Betriebssteuerungsabschnitt ist.

Andererseits berechnet die zweite CPU 301 einen Korrekturbetrag $\Delta PT(KH1)$, der auf den Kraftdaten vom Kraftsensor 22, den Lagedaten des Armendes 18, simultan mit den Kraftdaten, und den Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$ von der ersten CPU 300 basiert. Durch das Addieren eines Versetzbetrages zum berechneten Korrekturbetrag berechnet die zweite CPU 301 einen Sollwert $PTmod(KH1)$, um diesen zur ersten CPU 300 zu senden.

Es wird eine detaillierte Erläuterung der Steuerung durch die erste CPU 300 dargelegt. Bevor der Roboter 10 mit einer speziellen Aufgabe beginnt, verwendet eine Bedienungsperson

das Vorgabefach 14, um dem Roboter 10 in der gleichen Weise wie bei herkömmlichen Robotern mitzuteilen, welche Bearbeitungspunkte das Werkzeug am Werkstück W abfahren soll und welche Lage das Werkzeug einnehmen soll. Solche Daten werden
 5 in einem Vorgabepunktspeicher 400 im RAM 304 gespeichert.

Die Vorgabepunktdaten stellen die Werte dar, die die Basiskoordinaten des Roboters und den Bearbeitungspunkt des Werkzeugs verbinden. Der m-te Punkt der Vorgabedaten ist durch die folgende Matrix gezeigt:

$$10 \quad PTtch[m] = \begin{bmatrix} NX & OX & AX & X \\ NY & OY & AY & Y \\ NZ & OZ & AZ & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1), \text{ wobei}$$

NX, NY und NZ die X-Y-Z-Komponenten eines Normalenvektors sind, OX, OY und OZ die X-Y-Z-Komponenten eines Ausrichtungsvektors sind, AX, AY und AZ die X-Y-Z-Komponenten eines Zustellvektors sind und X, Y und Z die X-Y-Z-Komponenten eines
 15 Positionsvektors des m-ten Vorgabepunktes sind. Jede Komponente des Vektors wird durch ein Koordinatensystem 0-XYZ (siehe Fig. 2) mit dem Ursprung 0 am vorbestimmten Standardpunkt des Arbeitskörpers 16 dargestellt.

Der Normalenvektor, der Ausrichtungsvektor und der Zustellvektor, die zueinander senkrecht sind, zeigen die Arbeitsrichtung des Werkzeugs am Vorgabepunkt an, der durch die
 20 vorstehende Matrix gezeigt ist. Die Variablen zum Anzeigen der Punkte, auf die sich in der folgenden Erläuterung bezogen wird, sind ebenfalls durch den gleichen Matrizentyp dargestellt.
 25

Nach dem Vorgabevorgang beginnt der Roboter 10 in Erwiderung auf ein Vorgangsstartsignal mit der speziellen Aufgabe. Zuallererst interpoliert eine Pfadinterpolierschaltung 402

die Daten PTtch(KHO) vom KHO-ten Vorgabepunkt, die vom Vorgabepunktspeicher 400 ausgesendet wurden, und berechnet dann Standardpfaddaten PTpath(KH1) für das Werkzeug 20. Diese Standardpfaddaten PTpath(KH1) legen einen Standardpfad fest, dem das Werkzeug 20 folgen soll. Anschließend werden die Standardpfaddaten PTpath(KH1) zur zweiten CPU 301 gesendet, die Daten PTmod(KH1) mit modifiziertem Sollpunkt produziert, die die CPU 301 zu einer Schaltung 404 für inverse kinematische Transformation sendet.

Die Schaltung 404 für inverse kinematische Transformation wandelt die Daten PTmod(KH1) mit modifiziertem Sollpunkt in Rotationswinkeldaten $\Theta_{\text{host}}(\text{KH1})$ für jede der sechs Achsen um. Die Rotationswinkeldaten werden zu den entsprechenden Servokreisen 320 bis 330 gesendet. Dann werden über die entsprechenden Treiberschaltungen 332 bis 342 die Motoren 30, 40, 50, 60, 70 und 80 für jede Achse angetrieben, um den Bearbeitungspunkt des Schleifsteins 20 zu dem Punkt zu verschieben, der den Daten PTmod(KH1) mit modifiziertem Sollpunkt entspricht. Fig. 7 zeigt die Beziehung zwischen dem Schleifstein 20, dem Werkstück W, PTpath(KH1), $\Delta\text{PT}(\text{KH1})$ und PTmod(KH1).

Im folgenden schließt sich unter Bezugnahme auf Fig. 6 die Erläuterung der zweiten CPU 301 zum Bestimmen der Daten PTmod(KH1) mit modifiziertem Sollpunkt an. Die zweite CPU 301 führt ihren Prozeß parallel mit der ersten CPU 300 aus. Der Zeitintervall in der ersten CPU 300 zum Übertragen von PTpath(KH1) zur zweiten CPU 301 ist gleich dem Gesamtzeitintervall in der zweiten CPU 301 zum Empfangen von PTpath(KH1) von der ersten CPU 300, zum Berechnen der Korrekturdaten PTmod(KH1) und zum Übertragen von diesen zur ersten CPU 300 zurück.

Wenn PTpath(KH1) von der ersten CPU 300 aufgenommen wird, beginnt die zweite CPU 301 mit ihrem Steuerungsprozeß. Als

erstes wird jeder Satz von Rotationswinkelsdaten $\Theta_{\text{enc}}(\text{KH1})$ von den Kodierern 34, 44, 54, 64, 74 und 84 der sechs Achsen in der Schaltung 406 für kinematische Transformation unter Verwendung der folgenden Gleichung in Flanschendedaten
 5 $\text{PF}(\text{KH1})$ umgewandelt:

$$\text{PF}(\text{KH1}) = \Lambda[\Theta_{\text{enc}}(\text{KH1})] \dots (2),$$

wobei Λ eine kinematische Transformation und $[\Theta_{\text{enc}}(\text{KH1})]$ ein Winkelvektor ist.

Anschließend berechnet eine Werkzeugbearbeitungspunktkoordinaten-/Sensorkoordinaten-Berechnungsschaltung 408 unter
 10 Verwendung der Flanschendedaten $\text{PF}(\text{KH1})$ in den folgenden Formeln (3) und (4) Sensorendedaten $\text{PS}(\text{KH1})$ und Istpositionsdaten $\text{PTenc}(\text{KH1})$:

$$\text{PS}(\text{KH1}) = \text{PF}(\text{KH1}) \cdot \Pi_{f \rightarrow s} \dots (3)$$

15 $\text{PTenc}(\text{KH1}) = \text{PF}(\text{KH1}) \cdot \Pi_{f \rightarrow t} \dots (4),$ in denen

$\Pi_{f \rightarrow s}$ eine Position/Lage-Matrix ist, die die Position des Sensorendes in Beziehung zum Flanschende des Werkzeugs darstellt, und $\Pi_{f \rightarrow t}$ eine Position/Lage-Matrix ist, die die Position des Bearbeitungspunktes in Beziehung zum Flanschende
 20 darstellt.

Der Zweck der vorstehenden Umwandlung besteht darin, die Kraft und das Moment jeder Achse am Kraftsensor 22 in die an der Position des Werkzeugs 20 umzuwandeln.

Wenn die Flanschendedaten $\text{PF}(\text{KH1})$ eingegeben werden, werden
 25 Kraftdaten $\text{Fsen}(\text{KH1})$ vom Kraftsensor 22 über die Sensorsteuerungseinrichtung 24 ebenfalls eingegeben. Die Kraftdaten $\text{Fsen}(\text{KH1})$ stellen gemäß Vorbeschreibung Kraft und Moment jeder Achse der Sensorkoordinate 0-Xs-Ys-Zs mit dem Ursprung 0

an der Position des Kraftsensors 22 dar. Die Kraftdaten $F_{sen}(KH1)$ werden durch einen sechsdimensionalen Vektor dargestellt.

Die Kraftdaten $F_{sen}(KH1)$ setzen sich aus einer Gewichtskraft M_{tool} des Werkzeugs 20 und einer Rückwirkungskraft F_w , die vom Werkstück W auf das Werkzeug 20 ausgeübt wird, zusammen. In diesem Ausführungsbeispiel wird angenommen, daß die Rückwirkungskraft F_w gleich einem Sollwert F_{zo} ist, der zuvor in einem Sollkraftspeicher 412 des RAMs 304 gespeichert wird. Wenn sich der Roboter 10 im freien Raum bewegt und die Lage des Armendes 18 ändert, ändert sich ebenfalls die Werkzeuggewichtskraft für jede der sechs Achsen, die durch den Kraftsensor 22 erfaßt wird.

Zur Erleichterung der Erläuterung der Änderung der Werkzeuggewichtskraft aus der Werkzeuglageänderung wird das Werkzeug 20 nur in Gleitrichtung des Nachgiebigkeitsmechanismus 19, d.h. in Verschiebungsrichtung, reguliert. Außerdem entspricht die Gleitrichtung sowohl der Zs-Achse des Sensorkoordinatensystems als auch der in Fig. 4 gezeigten Verschiebungsrichtung des Nachgiebigkeitsmechanismus 19. Wie es in Fig. 8 gezeigt ist, ist eine Zs-Achsen-Komponente der Kraftdaten F_{sen} eine Differenz zwischen einer Zs-Achsen-Komponente F_{tool} der Werkzeuggewichtskraft und der Rückwirkungskraft F_w des Werkstücks W . Wenn der Winkel zwischen der Korrekturrichtung (Zs-Achse) und der Gravitationsrichtung (strichpunktierte Linie) Θ ist, wird die Zs-Achsen-Komponente F_{tool} der Werkzeuggewichtskraft mit der Formel $F_{tool} = M_{tool} \cdot \cos\Theta$ berechnet. Wenn die vom Werkstück W auf das Werkzeug 20 ausgeübte Rückwirkungskraft durch F_w dargestellt ist, wird die Zs-Achsen-Komponente F_{zs} der Kraftdaten F_{sen} entsprechend den folgenden Formeln berechnet:

$$F_{zs} = M_{tool} \cdot \cos\Theta - F_w$$

$$= F_{\text{tool}} - F_w \quad \dots (5)$$

Die an jede Achse angelegte Werkzeuggewichtskraft wird in der Werkzeuggewichtskraft-Berechnungsschaltung 410 in Fig. 6 berechnet. Als erstes wird der Wert $\cos\theta$ auf den Sensorkoordinatendaten PS(KH1) basierend berechnet. Als nächstes wird die Werkzeuggewichtskraft F_{tool} in Korrekturrichtung (Zs-Achse) unter Verwendung der vorgespeicherten Werkzeugdaten M_{tool} berechnet.

Wenn die X-Y-Ebene des Roboterkoordinatensystems parallel zum Boden verläuft (siehe Fig. 2), ist die Zs-Richtung des Roboterkoordinatensystems 0-X-Y-Z mit der Gravitationsrichtung identisch, so daß der Wert von $\cos\theta$ durch das Entnehmen einer Komponente der Sensorkoordinatendaten PS(KH1) erhalten werden kann. Und zwar stellen die Sensorkoordinatendaten PS(KH1) eine Relativposition und Relativlage des Sensorkoordinatensystems in bezug auf das Roboterkoordinatensystem 0-X-Y-Z dar. Diese sind im folgenden gezeigt:

$$PS(KH1) = \begin{bmatrix} X_{sx} & Y_{sx} & Z_{sx} & X \\ X_{sy} & Y_{sy} & Z_{sy} & Y \\ X_{sz} & Y_{sz} & Z_{sz} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

Dementsprechend wird der Winkel $\cos\theta$, der durch die Z-Achse des Sensorkoordinatensystems und die Z-Achse des Roboterkoordinatensystems festgelegt ist, wie folgt gezeigt:

$$\cos\theta = Z_{sz} \quad \dots (7)$$

Wenn die X-Y-Ebene des Roboterkoordinatensystems nicht mit dem Boden parallel ist, ist andererseits der Winkel $\cos\theta$ ein inneres Produkt eines Vektors G in Gravitationsrichtung des Roboterkoordinatensystems, d.h. $(X, Y, Z) = (0, 0, 1)$, und des Zs-Vektors (Z_{sx}, Z_{sy}, Z_{sz}) der Sensorkoordinatendaten

PS(KH1).

$$\cos \Theta = (G \cdot Z_s) / \|G\| \cdot \|Z\| \quad \dots(8)$$

Wenn eine Rückwirkungskraft, die um ΔF größer als eine Sollkraft F_{zo} ist, ausgeübt wird, kann eine solche Differenz ΔF in der folgenden Weise angegeben werden. In Fig. 9 stellen dF_{tool} , dF_w und $d\Delta F$ die Verschiebung des Nachgiebigkeitsmechanismus 19 entsprechend den Kräften F_{tool} , F_w bzw. ΔF dar. Das Armende 18, das auf der linken Seite der Zeichnung gezeigt ist, befindet sich in einem Zustand, in dem die vom Werkstück W ausgeübte Rückwirkungskraft gleich der Sollkraft F_{zo} ist. Andererseits befindet sich das Armende 18, das auf der rechten Seite der Zeichnung gezeigt ist, in einem Zustand, in dem sich das Armende 18 in den rechten Abschnitt des Werkstücks W bewegt hat, wo der Abstand zwischen dem Werkstück W und dem Armende 18 um d_0 kürzer ist, während die Rückwirkungskraft F_w vom Werkstück W aus um ΔF größer ist.

Wenn die Rückwirkungskraft F_w des Werkstücks W gleich der Sollkraft F_{zo} ist, ist die durch die Formel (5) gezeigte Beziehung erfüllt. Wenn die Kraft ΔF zu F_w addiert wird, ist eine durch die folgende Formel (9) gezeigte Beziehung erfüllt.

$$F_{zs} = F_{tool} - (F_w + \Delta F) \quad \dots(9)$$

Da die Werte F_{zs} , F_{tool} und F_w bereits bekannt sind, wird die zusätzliche Kraft ΔF durch Verwendung der folgenden Formel erhalten:

$$\Delta F = -F_{zs} + F_{tool} - F_w \quad \dots(10)$$

Das berechnete ΔF ist der Betrag, der benötigt wird, um die Rückwirkungskraft zu korrigieren. Die Positionsabweichung Δd , die benötigt wird, um ΔF auf Null zu bringen, wird in

einer Abweichungsumwandlungsschaltung 414 in Fig. 6 erhalten.

Wenn die Werkzeuggewichtskraft M_{tool} (auf die sich im folgenden als M bezogen wird) unterhalb des Sensors ein materielles Teilchen ist, ergibt sich eine in der folgenden Bewegungsgleichung gezeigte Beziehung.

$$\Delta F = M\ddot{D} + c\dot{D} + K\Delta d \quad \dots(11)$$

In der vorstehenden Formel stellt D die Werkzeugposition in Richtung der Zs-Achse dar, die sich auf die Position des Sensors stützt; c und k zeigen jeweils eine Viskositätskonstante und eine Federkonstante des Nachgiebigkeitsmechanismus an. Aus der Formel (11) wird die Positionsabweichung d wie folgt erhalten:

$$\Delta d = (\Delta F - M\ddot{D} - c\dot{D}) / K \quad \dots(12)$$

Da die vorstehenden Berechnungen in jedem diskreten Zyklus ausgeführt werden, ist $\Delta d(KH1)$ ungefähr wie folgt. In der folgenden Gleichung ist τ eine Zykluszeit, $\Delta d(KH1-1)$ ist die Positionsabweichung Δd während des letzten Zyklus und $\Delta d(KH1-2)$ ist Δd während des vorletzten Zyklus. Indem \ddot{D} und \dot{D} unter Verwendung von $\Delta d(KH1-1)$ und $\Delta d(KH1-2)$ angenähert werden, wird $\Delta d(KH1)$ angenähert als:

$$\begin{aligned} \Delta d(KH1) = & 1/K \cdot [\Delta F \\ & - M/\tau^2 \{D(KH1-2) - 2D(KH1-1) + D(KH1)\} \\ & - c/\tau \{D(KH1-1) - D(KH1)\}] \quad \dots(13), \text{ wobei} \end{aligned}$$

$$D(KH1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta d(KH1) \end{bmatrix} \text{ ist.}$$

Wenn in den vorstehend genannten Formeln M und $c \approx 0$ sind, dann ist $\Delta d(KH1) = \Delta F/K$. Als Ergebnis würden sich die Trägheits- und Viskositätsterme um einen Zyklus verzögern. Da jedoch $\Delta d(KH1) \approx \Delta d(KH1 - 1)$ ist, ist es möglich, wenn ein Zyklus τ kürzer als einhundert Millisekunden ist, die Positionsabweichung $\Delta d(KH1)$ in Beziehung zu ΔF unter Nichtbeachtung der geringfügigen Zyklusverzögerung zu berechnen.

In einigen Fällen, wenn z.B. die Steuerung statisch ist oder wenn M und die Konstante c äußerst kleine Werte sind, können sowohl M als auch c aus dieser Rechnung entfernt werden.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel werden die Positionsabweichungen $\Delta d(KH1-1)$ und $\Delta d(KH1-2)$ (d.h. die Werte einen Zyklus und zwei Zyklen vor $\Delta d(KH1)$) zum Annähern der Werkzeugposition D verwendet. Es ist ebenfalls möglich, $\Delta d(KH1 + 1)$ und $\Delta d(KH1 + 2)$ (d.h. die Werte einen Zyklus und zwei Zyklen nach $\Delta d(KH1)$) zu verwenden, um die Werkzeugposition anzunähern, wie es in der folgenden Formel gezeigt ist:

$$\begin{aligned} \Delta d(KH1) = & 1/K \cdot [\Delta F \\ & - M/\tau^2 \{d(KH1) - 2D(KH1+1) + D(KH1+2)\} \\ & - c/\tau \{D(KH1+1) - D(KH1+2)\}] \dots (13') \end{aligned}$$

Sich auf den Positionsabweichungsbetrag $\Delta d(KH1)$ in Beziehung zur Kraft ΔF und die Sensorkoordinatendaten $PS(KH1)$ stützend, wird in einer Idealpositions-Berechnungsschaltung 416 (Fig. 6) eine Idealposition $PSaim(KH1)$ des Sensors 22, an der die Rückwirkungskraft gleich der Sollkraft $Fzo(KH1)$ ist, unter Verwendung der folgenden Formel berechnet:

$$PSaim(KH1) = PS(KH1) \cdot D(KH1) \dots (14)$$

$\Pi_{S \rightarrow t}$ wird wie folgt unter Verwendung von $PTenc(KH1)$, der in Schritt 408 berechnet wurde, berechnet.

$$\Pi_{S \rightarrow t} = PSaim(KH1)^{-1} \cdot PTaim(KH1) \dots (14')$$

5 $PTaim(KH1) = PSaim(KH1) \cdot \Pi_{S \rightarrow t} \dots (15')$, wobei $\Pi_{S \rightarrow t}$ eine Matrix darstellt, die die Position und die Lage der Werkzeugbearbeitungspunktkoordinaten in Beziehung zu den Sensorkoordinaten anzeigt.

10 Die Idealposition $PSaim(KH1)$, die Daten im Sensorkoordinatensystem darstellt, wird in einer Werkzeugbearbeitungspunkt-Umwandlungsschaltung 418 (Fig. 6) entsprechend der folgenden Formel in Daten $PTaim(KH1)$ im Roboterkoordinatensystem umgewandelt:

15 Anschließend wird Gleichung (16) verwendet, um eine Abweichung $R-ofs(KH1)$ zwischen der Idealposition $PTaim(KH1)$ und den Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$ zu erhalten, die unter Verwendung der Pfadinterpolierschaltung 402 erhalten wurden.

$$R-ofs(KH1) = PTpath(KH1)^{-1} \cdot PTaim(KH1) \dots (16)$$

20 Das Verhältnis $R-ofs(KH1)$ wird verwendet, um die Position in Korrekturrichtung zu korrigieren und eine Vorgabegeschwindigkeit in Vorschubrichtung des Werkzeugs aufrechtzuerhalten, die zur Korrekturrichtung normalerweise senkrecht verläuft. Diese Korrektur unter Verwendung von $R-ofs(KH1)$ ist notwendig, da die Werkzeug-Ist-Position in der Tat hinter der Standardpfadposition $PTpath(KH1)$, wie es in Fig. 7 gezeigt ist, liegt; die Idealposition des Werkzeugbearbeitungspunktes $PTaim(KH1)$, die der Werkzeug-Ist-Position entspricht, befindet sich ebenfalls dahinter. Die Korrektur mit diesen verzögerten Werten verändert die Bewegungsgeschwindigkeit des Werkzeugs.

25

Anschließend bestimmt eine Korrektur-element-Auswahlschaltung 420 (Fig. 6) durch das Anwenden des Verhältnisses $R\text{-ofs}(KH1)$ nur auf die Matrixkomponente, die dem durch den Kraftsensor 22 erfaßten Element entspricht, einen Korrekturbetrag $\Delta PT(KH1)$. Der Korrekturbetrag $\Delta PT(KH1)$ wird wie folgt bestimmt:

$$\Delta PT(KH1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (17)$$

In der vorstehenden Matrix ist Z gleich dem Element Z im Verhältnis $R\text{-ofs}(KH1)$. Der Korrekturbetrag $\Delta PT(KH1)$ wird zu einer Abweichungserfaßschaltung 422 gesendet und mit einem vorbestimmten Wert β verglichen. Wenn der absolute Wert $\|\Delta PT(KH1)\|$ von $\Delta PT(KH1)$ größer als β ist, kann der Roboter aus dem gewünschten Pfad davonlaufen. In diesem Fall wird ein Noteingriff, wie z.B. ein Nothalt, vorgenommen. Andererseits wird, wenn $\|\Delta PT(KH1)\|$ kleiner als β ist, die nächsten Bearbeitungspunkt-Korrekturdaten $PTpmod(KH1)$ unter Verwendung des Korrekturbetrags $\Delta PT(KH1)$ entsprechend der folgenden Formel berechnet.

$$PTpmod(KH1) = PTpath(KH1) \cdot \Delta PT(KH1) \dots (18)$$

Anschließend werden in einer Sollversetzungsschaltung 424 die Daten $PTmod(KH1)$ mit modifiziertem Sollpunkt sich auf einer Versetzung $Ofs(KH1)$ vom Sollpunkt aus stützend entsprechend der folgenden Formel bestimmt.

$$PTmod(KH1) = PTpmod(KH1) \cdot Ofs(KH1) \dots (19), \quad \text{wobei } PTpmod(KH1) \text{ eine Anfangs-Werkzeugende-Sollkoordinate anzeigt.}$$

Die Daten $PTmod(KH1)$ mit modifiziertem Sollpunkt werden zur ersten CPU 300 übertragen; der Prozeß in der zweiten CPU

301 ist abgeschlossen.

Die vorstehend genannten Prozesse, die in der ersten CPU 300 und der zweiten CPU 301 ausgeführt werden, sind durch Fließdiagramme der Fig. 10 bzw. 11 gezeigt. Die Robotersteuerungseinrichtung 12 des vorliegenden Ausführungsbeispiels weist zwei CPUs 300 und 301 auf, die in Fig. 6 gezeigt sind. Diese zwei CPUs 300 und 301 führen ihre jeweiligen Prozeduren parallel zueinander aus.

Wenn der Roboter 10 in Antwort auf das Vorgangsstartsignal mit einer speziellen Aufgabe beginnt, führt die erste CPU 300 die folgenden Schritte in Reihenfolge aus:

Schritt 500 berechnet die Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$ durch das Interpolieren der Vorgabepunktdaten $PTtch(KH1)$, die im Speicher 400 gespeichert sind.

Schritt 502: Aussenden der Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$ zur zweiten CPU 301 und Anforderung der Daten $PTmod(KH1)$ mit modifiziertem Sollpunkt von der zweiten CPU 301.

Schritt 504: Aufnehmen von $PTmod(KH1)$ von der zweiten CPU 301.

Schritt 506: Umwandeln von $PTmod(KH1)$ in den Rotationswinkel $\Theta_{host}(KH1)$ für jede Achse.

Schritt 508: Aussenden des Rotationswinkels $\Theta_{host}(KH1)$ zu den Servokreisen 320 bis 330 für die sechs Achsen.

Schritt 510: Inkrementieren von $KH1$ um 1 und Zurückkehren zu Schritt 500, um die Schritte 500 bis 510 zu wiederholen.

Die zweite CPU 301 führt die folgenden Schritte aus:

Schritt 600: Aufnehmen der Standardpfaddaten $PTpath(KH1)$ von der ersten CPU 300.

Schritt 602: Aufnehmen der Kraftdaten $Fsen(KH1)$ von der Sensorsteuerungseinrichtung 24.

5 Schritt 604: Aufnehmen der Rotationswinkeldaten $\Theta_{enc}(KH1)$ von den einzelnen Achsenkodierern 34, 44, 54, 64, 74 und 84 in dem Moment, wenn der Kraftsensor 22 mit seiner Messung beginnt.

10 Schritte 606, 608, 610, 612, 614, 616 und 618: Berechnen von F_{tool} , ΔF , $\Delta d(KH1)$, $PSaim(KH1)$, $PTaim(KH1)$, $R-ofs(KH1)$ und $\Delta PT(KH1)$ gemäß ihren entsprechenden Formeln.

15 Schritt 620: Vergleichen des Korrekturbetrags $\Delta PT(KH1)$ mit dem vorbestimmten Wert β . Wenn $\|\Delta PT(KH1)\| \geq \beta$ ist, geht das Programm zu Schritt 628. Wenn $\|\Delta PT(KH1)\| < \beta$ ist, geht es zu Schritt 622.

Schritt 622: Berechnen der Bearbeitungspunkt-Korrekturdaten $PTpmod(KH1)$.

Schritt 624: Berechnen der Daten $PTmod(KH1)$ mit modifiziertem Sollpunkt.

20 Schritt 626: Aussenden der Daten $PTmod(KH1)$ mit modifiziertem Sollpunkt zur ersten CPU 300 und Rückkehr zu Schritt 600.

Schritt 628: Anhalten des Roboters 10 als eine Notmaßnahme und Beenden des Prozesses.

25 Durch das Wiederholen der vorstehend genannten Prozeßschritte, führt der Roboter 10 die Arbeit fort, während die Kraft des Schleifsteins 20 gegen das Werkstück W entsprechend

der Sollkraft reguliert wird.

Fig. 12 stellt die Bewegung des Armendes 18 dar, wenn ein Werkstück W, das mit den für die herkömmlichen Roboter in den Fig. 14A und 14B verwendeten identisch ist, durch den Roboter des vorliegenden Ausführungsbeispiels bearbeitet wird. In
5 Fig. 12 zeigt die Volllinie die Bewegung des Armendes 18 an, die gestrichelte Linie zeigt den Sollwert des Armendes 18 an und die Strichpunktlinie die Idealposition des Armendes 18 mit idealer Rückwirkungskraft. Während der Bearbeitung des
10 Werkstücks bewegt sich das Roboterarmende in der Zeichnung von links nach rechts. Fig. 12 zeigt deutlich, daß der Roboter des vorliegenden Ausführungsbeispiels im Unterschied zum Roboter nach dem Stand der Technik der Außenlinie des Werkstücks W ohne Überspringen schnell folgen kann.

15 Mit dem vorliegenden Ausführungsbeispiel werden die folgenden Wirkungen vorgesehen.

(1) Da der Korrekturbetrag zum Bestimmen des Sollpunktes sich auf die Informationen, die vom Kraftsensor 22 ausgesendet wurden, und die Informationen, die die Position und die
20 Lage des Schleifsteins 20 auf dem Abfühlpunkt betreffen, stützend berechnet wird, kann der Roboter eine spezielle Aufgabe ohne Reduzierung seiner Betriebsgeschwindigkeit ganz genau ausführen.

(2) Da der Sollpunkt sich nicht nur auf die Informationen vom Kraftsensor 22 stützend bestimmt wird, sondern sich eben-
25 falls auf die Vorgabepunkte entlang eines Referenzpfades stützend, weicht der Roboter niemals vom gewünschten Pfad ab.

(3) Sollpunkte werden in einem Zyklus, der kürzer als einhundert Millisekunden ist, aufeinanderfolgend so bestimmt,
30 daß eine genaue Steuerung verwirklicht werden kann.

(4) Nach der Berechnung des Sollwertes werden die Position und die Lage des Werkzeugs 20 sich auf die Servokreise der sechs Achsen stützend in der gleichen Weise wie nach dem Stand der Technik gesteuert. Der Roboter kann daher als ein gewöhnlicher Vorgabewiedergaberoboter verwendet werden, wenn die Kraftsteuerung nicht erforderlich ist.

(5) Da die Ist-Steuerung der Position und der Lage des Werkzeugs 20 die gleiche wie die der Roboter nach dem Stand der Technik ist, kann die vorliegende Erfindung verwirklicht werden, indem nur eine neue CPU-Platine und eine neue Schnittstelle für die Vorgabewiedergabe-Robotersteuerungseinrichtung nach dem Stand der Technik bereitgestellt werden. Folglich kann der Roboter mit steuerbarer Kraft billig hergestellt werden.

(6) In seiner Eigenschaft als Bearbeitungsroboter kann dieser Roboter ebenfalls als eine Ausgleichvorrichtung verwendet werden: wenn die Bedienungsperson die Spitze des Kraftsensors 22 mit der Hand hält, um ein durch den Roboter gehaltenes schweres Material einfach zu transportieren, steuert die Ausgleichvorrichtung die Transportrichtung.

(7) Wenn der Korrekturbetrag ΔPT berechnet wird, wird ein Element der Matrix für jede Berechnung in geeigneter Weise vorgesehen, so daß die Kraft nur in einer geforderten Axialrichtung reguliert wird. Für eine Achse, bei der keine Notwendigkeit der Kraftsteuerung besteht, wird nur die Positionssteuerung vorgesehen.

(8) Da der Roboter das Eigengewicht des Werkzeugs reguliert, kann dieses eine spezielle Aufgabe in einer wahlweisen Lage unabhängig von der Schwerkraft ausführen.

Während die Erfindung unter Bezugnahme auf ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel gezeigt und beschrieben wurde, ist es

für den Fachmann selbstverständlich, daß zahlreiche andere Änderungen in der Form und in Einzelheiten vorgenommen werden können, ohne daß vom Geltungsbereich der Erfindung, der in den beigefügten Patentansprüchen festgelegt ist, abgewichen wird.

Das vorliegende Ausführungsbeispiel verwendet zum Beispiel einen Nachgiebigkeitsmechanismus (siehe Fig. 4), der senkrecht zur Achse des Schleifsteins 20 gleitet. Es ist ebenfalls möglich, einen Nachgiebigkeitsmechanismus 19a zu verwenden, der parallel zur Achse des Schleifsteins 20a gleitet, wie es durch einen Pfeil in Fig. 13 gezeigt ist. Für diese Nachgiebigkeitsmechanismen 19 und 19a kann ein Nachgiebigkeitssystem mit entferntem Zentrum, das im allgemeinen RCC genannt wird, verwendet werden.

In der vorliegenden Erfindung werden die Werkzeugpositionsdaten von den Kodierern 34, 44, 54, 64, 74 und 84 in der Koordinatenumwandlungsschaltung 408 vom Roboterkoordinatensystem zum Sensorkoordinatensystem umgewandelt. Die Idealposition wird dann in Form des Sensorkoordinatensystems berechnet und in der Koordinatenumwandlungsschaltung 418 zum Roboterkoordinatensystem erneut umgewandelt. Alternativ dazu ist es möglich, die Kraftdaten vom Sensorkoordinatensystem zum Roboterkoordinatensystem umzuwandeln, um bei der Berechnung der Idealposition verwendet zu werden. In einem solchen Fall sind die Koordinatenumwandlungsschaltungen 408 und 418 in Fig. 6 weggelassen; hinter der Sensorsteuerungseinrichtung 24 ist eine andere Koordinatenumwandlungsschaltung vorgesehen, um die Kraftdaten vom Sensorkoordinatensystem zum Roboterkoordinatensystem umzuwandeln. Auch in diesem Fall können die im vorliegenden Ausführungsbeispiel beschriebenen Berechnungen verwendet werden, obwohl jeder Wert im Roboterkoordinatensystem angezeigt werden würde.

Deutschsprachige Übersetzung der Patentansprüche
der Europäischen Patentanmeldung Nr. 89 306 554.0-2302
des Europäischen Patents Nr. 0 349 291

Patentansprüche

1. Trackingsteuerungsroboter (10), der ein Werkzeug (R2)
hat, das an einem Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanis-
mus (R3) an einem Ende eines Arms des Roboters montiert ist,
5 wobei die Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungseinrichtung zwi-
schen der Kraft, die in eine Axialrichtung ausgeübt wird, und
der Verschiebung zwischen dem Werkzeug und dem Armende in der
gleichen Axialrichtung ein vorbestimmtes Verhältnis in einem
10 speziellen Koordinatensystem aufrechterhält,

wobei der Roboter das Armende (R1) mittels einer Armende-
Steuerungseinrichtung (R9) steuert, die die Position und die
Lage des Armendes in Echtzeit zu aufeinanderfolgenden Soll-
punkten für die Position und die Lage hin steuert, um das
15 Werkzeug (R2) zu bewegen, um einem Standardpfad zu folgen,
der aus vorgespeicherten Positionsdaten erhalten wird, und um
auf ein Werkstück (W) mit einer voreingestellten Sollkraft
einzuwirken,

wobei der Roboter aufweist:

20 Kodierer (34, 44, 54, 64, 74, 84), die mit jeder der je-
weiligen Rotationsachsen des Roboters verbunden sind,

eine Momentanzustand-Erfaßeinrichtung (R4), die die Mo-

mentanposition und die Momentanlage des Armendes (R1) erfaßt, indem die Rotationswinkeldaten von den Kodierern (34, 44, 54, 64, 74, 84) in Koordinaten für die Momentanposition und die Momentanlage des Armendes unter Verwendung von Gleichungen
5 für kinematische Transformationen umgewandelt werden,

eine Rückwirkungskraft-Erfaßeinrichtung (R5) zum Erfassen einer Rückwirkungskraft, die vom Werkstück (W) über das Werkzeug (R2) und den Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanismus zum Armende (R1) übertragen wird,

10 eine Verschiebungsumwandlungseinrichtung (R6), die die Differenz zwischen der erfaßten Rückwirkungskraft und einer voreingestellten Sollkraft des Werkzeugs (R2) berechnet und die Differenz in eine Verschiebung der Position des Armendes umwandelt, die benötigt wird, um diese Differenz Null zu set-
15 zen,

dadurch gekennzeichnet, daß dieser ferner aufweist:

eine Berechnungseinrichtung für den modifizierten Sollpunkt, um sich auf den gegenwärtigen Sollpunkt und auf die Verschiebung stützend einen modifizierten Sollpunkt für die
20 Position und die Lage des Armendes (R1) zu berechnen,

und daß die Berechnungseinrichtung für den modifizierten Sollpunkt aufweist:

eine Idealzustand-Berechnungseinrichtung (R7), die Daten, die eine erfaßte Istposition und Istlage des Armendes zu
25 einem bestimmten Zeitpunkt darstellen, und Daten aufnimmt, die die Verschiebung des Arms darstellen, die benötigt wird, um die Differenz zwischen der erfaßten Rückwirkungskraft und einer voreingestellten Sollkraft für den gleichen Zeitpunkt Null zu setzen, wobei die Idealzustand-Berechnungseinrichtung
30 einen Punkt berechnet, der einer Position entspricht, die

eine Idealposition und Ideallage des Armendes (R1) entsprechend der erfaßten Istposition haben würde, wobei die Idealposition als erfaßte Istposition und Istlage des Armendes berechnet wird, die mit der berechneten Positionsverschiebung des Armendes ausgeglichen sind, die benötigt wird, um die Differenz zwischen der erfaßten Rückwirkungskraft und einer voreingestellten Sollkraft Null zu setzen,

und

eine Korrekturbetrag-Berechnungseinrichtung (R8), die einen Korrekturbetrag für den vorgespeicherten Standardpfad berechnet, indem die berechnete Idealposition und Ideallage des Armendes mit einer Referenzposition und Referenzlage des Armendes auf dem vorgespeicherten Standardpfad verglichen werden,

und daß

der modifizierte Sollpunkt für die Position und die Lage des Armendes (R1) berechnet wird, indem die Referenzposition und die Referenzlage des Armendes auf dem vorgespeicherten Standardpfad entsprechend diesem Korrekturbetrag korrigiert werden.

2. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem

die Armende-Steuerungseinrichtung (R9)–Motoren (30, 40, 50, 60, 70, 80) zum Antrieb des Armendes (R1) aufweist und

die Momentanzustand-Erfaßeinrichtung (R4) aufweist: einen Rotationssensor (34, 44, 54, 64, 74, 84) der an den Achsen der Motoren befestigt ist, und eine Einrichtung, um in Erwiderung auf Signale vom Rotationssensor Positions- und Lageda-

ten für das Ende des Sensors und Positions- und Lagedaten für den Bearbeitungspunkt des Werkzeugs (R2) zu erzeugen, wobei sich die Daten auf einen vorbestimmten Punkt im Koordinatensystem stützen, und um die Momentanposition und Momentanlage des Werkzeugs (R2) aus diesen Daten zu berechnen.

3. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Momentanzustand-Erfaßeinrichtung (R4) und die Rückwirkungskraft-Erfaßeinrichtung (R5) ihre jeweiligen Erfaßvorgänge simultan ausführen.

4. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Rückwirkungskraft-Erfaßeinrichtung (R5) zwischen dem Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanismus (R3) und dem Werkzeug (R2) vorgesehen ist, um einen Wert der Kraft am Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanismus (R3) zu erfassen, wobei der erfaßte Wert die Differenz zwischen der Gravitationskraft am Werkzeug (R2) und der Rückwirkungskraft (F_w) ist, die vom Werkstück (W) zum Werkzeug (R2) übertragen wird.

5. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Verschiebungsumwandlungseinrichtung (R6) eine Einrichtung zum Berechnen eines Änderungsgrades der Rückwirkungskraft (F_w) entsprechend einem Änderungsgrad des Kraftwertes, der durch die Rückwirkungskraft-Erfaßeinrichtung (R5) erfaßt wird, aufweist.

6. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die

Verschiebungsumwandlungseinrichtung (R6) eine Einrichtung hat zum Berechnen der Verschiebung der Position des Werkzeugs, so daß die Rückwirkungskraft (F_w) vom Werkstück zum Werkzeug gleich der voreingestellten Sollkraft ist, indem eine Bewegungsgleichung des Werkzeugs (R2) als ein materielles Teilchen verwendet wird, wobei die Gleichung den Änderungsgrad der Rückwirkungskraft und einen Viskositätskoeffizienten und eine Federkonstante für den Verschiebung-in-Kraft-Umwandlungsmechanismus (R3) aufweist.

10

7. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 6, bei dem die Idealzustand-Berechnungseinrichtung (R7) eine Einrichtung (416) zum Berechnen der Idealposition und Ideallage des Armendes (R3) entsprechend der Verschiebung der Position des Werkzeugs (R2) und der Momentanposition und Momentanlage des Armendes (R3) hat.

20

8. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem der Roboter (10) eine Speichereinrichtung zum Halten von Daten der Referenzposition und der Referenzlage für das Armende (R3) auf dem Standardpfad hat, wobei die Daten zuvor entsprechend einem speziellen Vorgabeverfahren gespeichert werden, und die Korrekturbetrag-Berechnungseinrichtung (R8) eine Einrichtung zum Auslesen der Referenzpositions- und Referenzlage-Daten aus der Speichereinrichtung aufweist.

25

9. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Korrekturbetrag-Berechnungseinrichtung (R8) eine Einrichtung zum Berechnen einer Abweichung zwischen der Idealposition bzw. der Ideallage des Armendes und der Referenzposition bzw.

30

der Referenzlage des Armendes auf dem Standardpfad aufweist, um den Korrekturbetrag für die Position und die Lage des Armendes zu berechnen.

5 10. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Korrekturbetrag-Berechnungseinrichtung (R8) eine Einrichtung zum Modifizieren des Korrekturbetrages für die Position und die Lage des Armendes (R3) um einen voreingestellten Versetzwert aufweist.

10

11. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, bei dem die Korrekturbetrag-Berechnungseinrichtung (R8) eine Einrichtung hat, um den Korrekturbetrag für die Position und die Lage des Armendes mit einem vorbestimmten Wert zu vergleichen
15 und um die Position und die Lage des Armendes in Echtzeit nur dann zu steuern, wenn der Korrekturbetrag geringer als der vorbestimmte Wert ist.

12. Trackingsteuerungsroboter nach Anspruch 1, wobei das
20 vorbestimmte Verhältnis in einem Sensorkoordinatensystem vorliegt, wobei der aus den vorgespeicherten Positionsdaten erhaltene Standardpfad in einem Roboterkoordinatensystem vorliegt, wobei die Momentanposition und Momentanlage des Armen-
des im Sensorkoordinatensystem vorliegen, wobei die Idealpo-
25 sition und die Ideallage des Armendes im Sensorkoordinatensystem vorliegen, wobei die Umwandlungseinrichtung (418) vorgesehen ist, um die Idealposition und Ideallage des Armendes vom Sensorkoordinatensystem in das Roboterkoordinatensystem umzuwandeln und wobei die Korrekturbetrag-Berechnungseinrich-
30 tung (R8) den Korrekturbetrag für die Position und die Lage

des Arms im Roboterkoordinatensystem berechnet, indem die umgewandelte Idealposition und Ideallage des Armendes mit der Referenzposition und der Referenzlage des Armendes auf dem Standardpfad verglichen werden.

FIG. 1

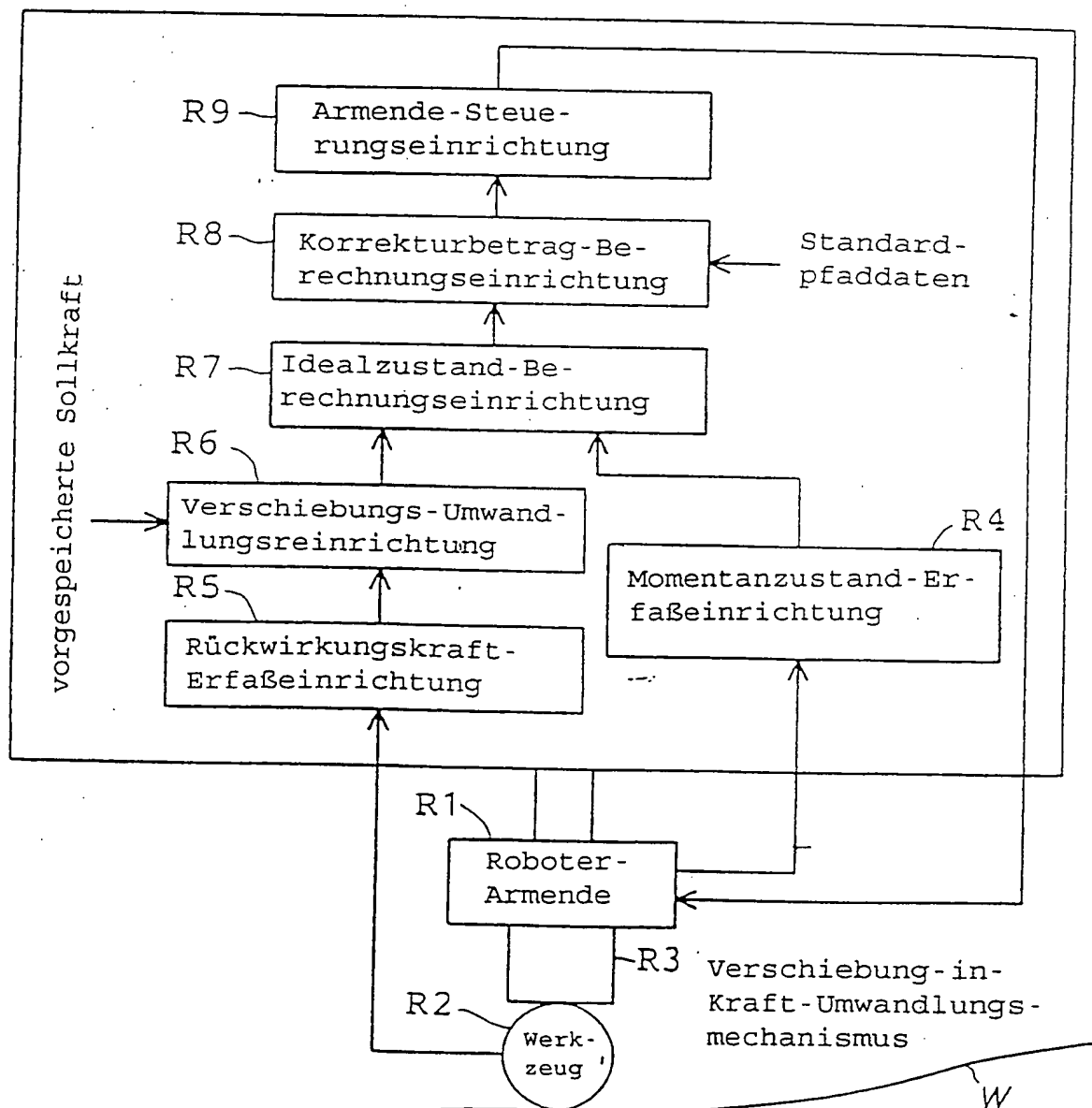
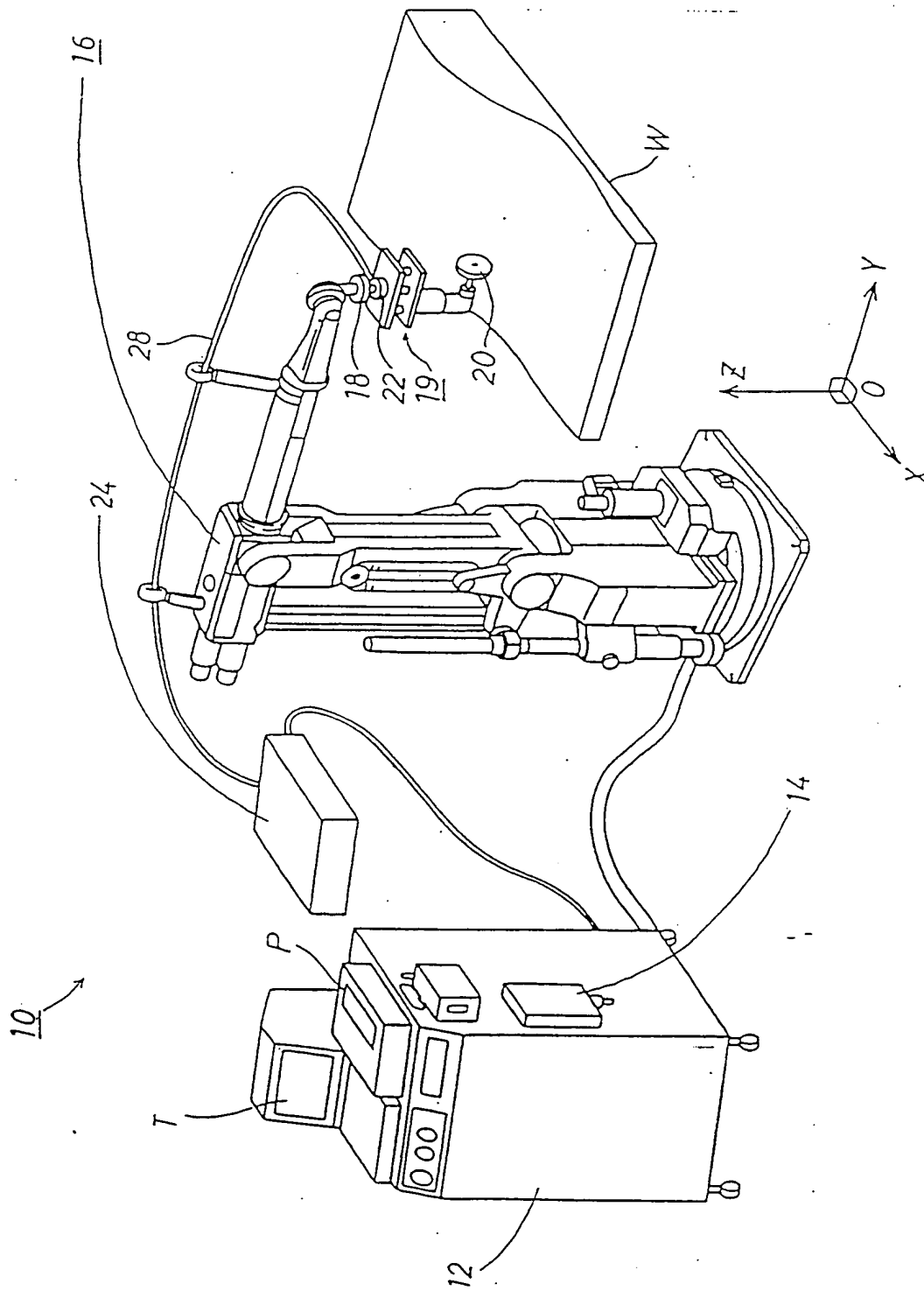


FIG. 2



3/14

FIG. 3A

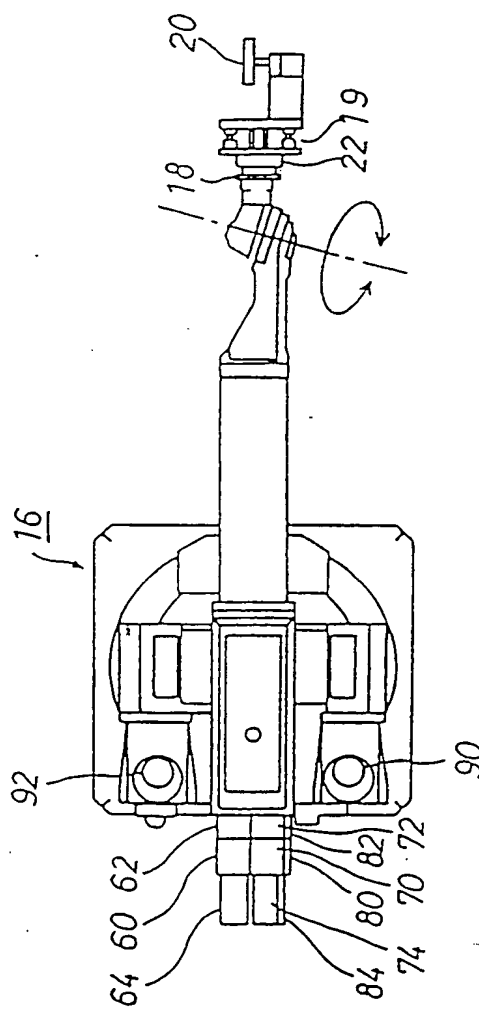


FIG. 3B

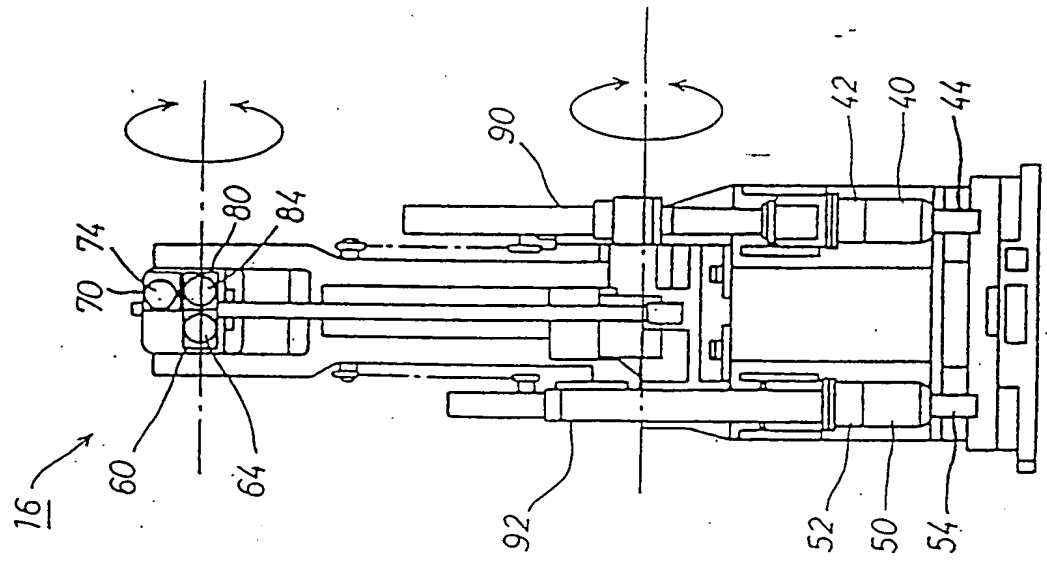
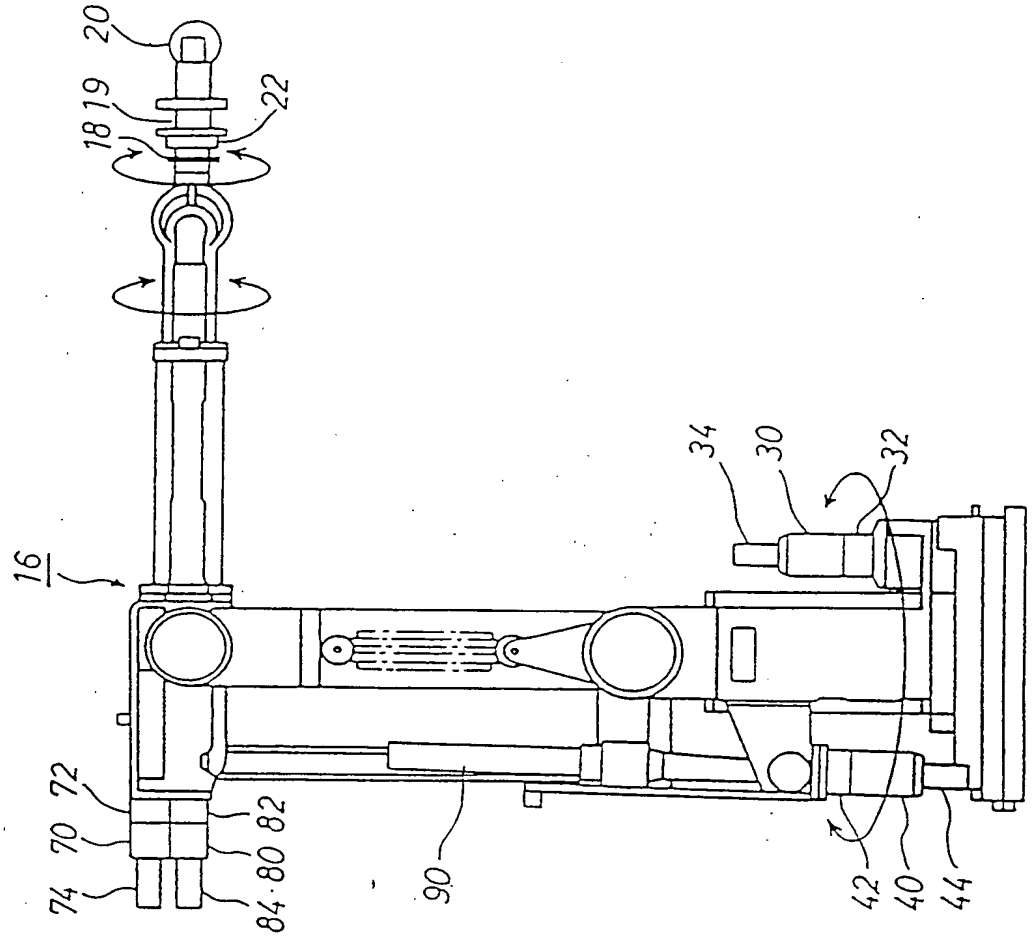


FIG. 3C



5/14

FIG. 4

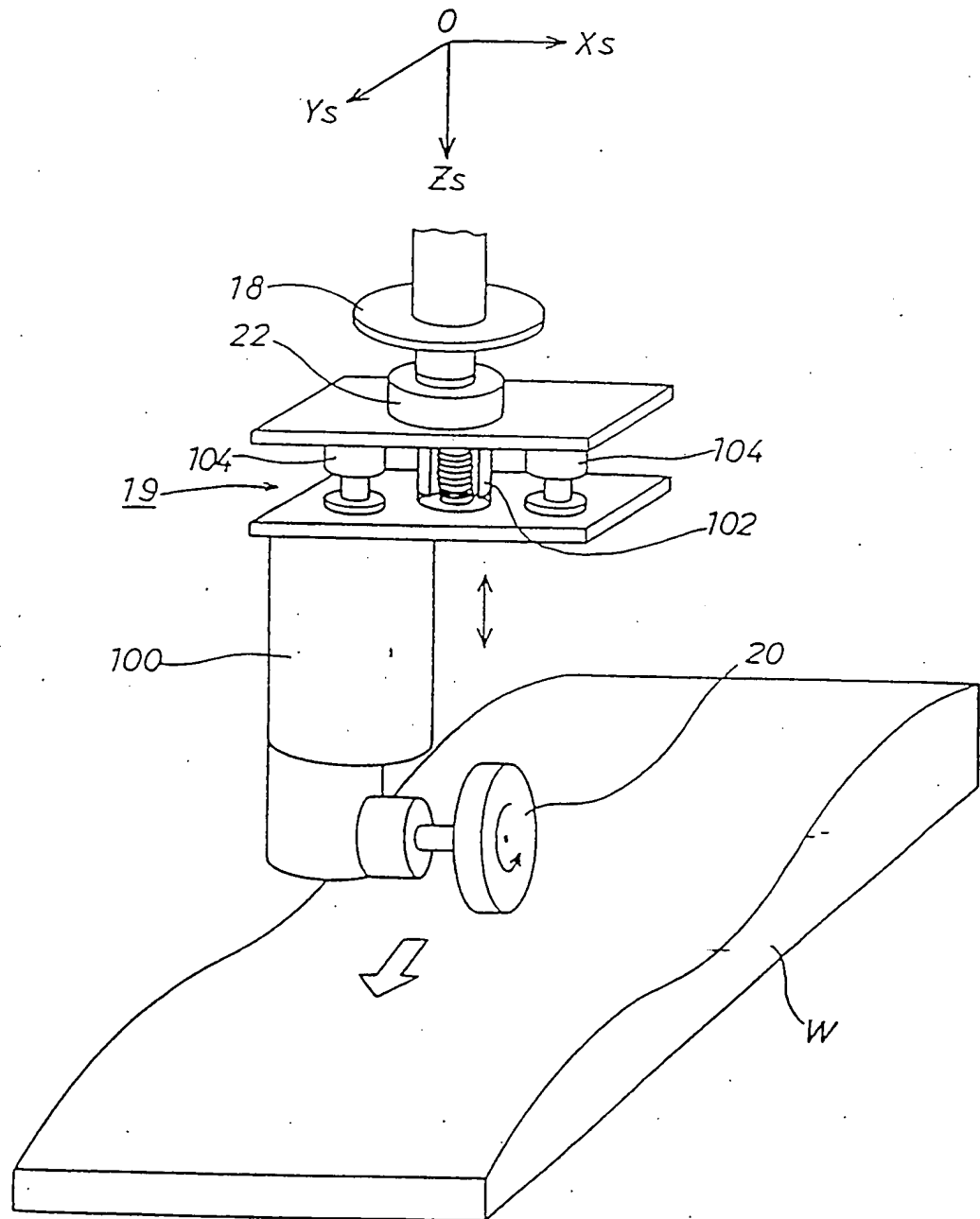
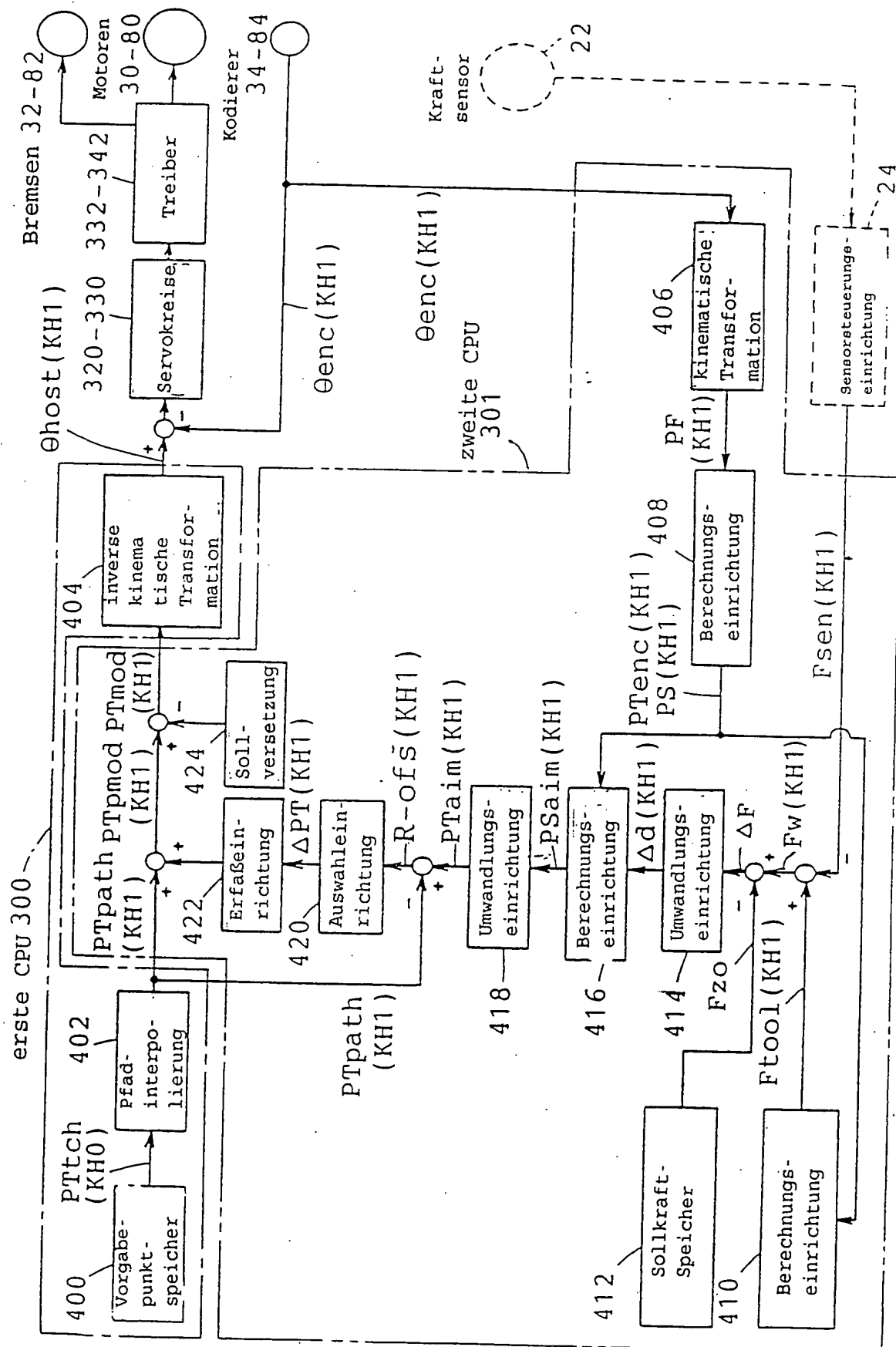
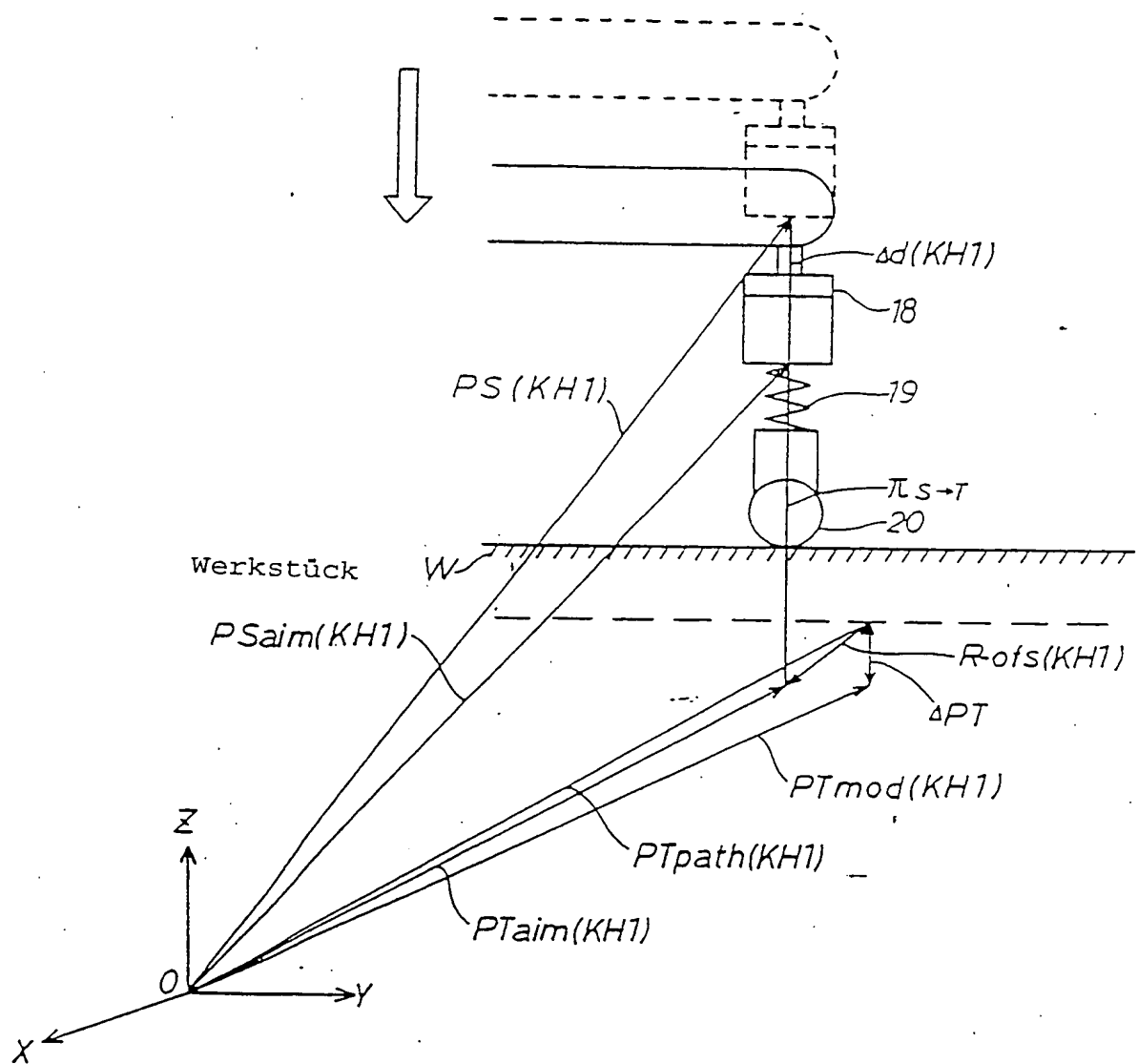


FIG. 6



8/14

FIG. 7



9/14

FIG. 8

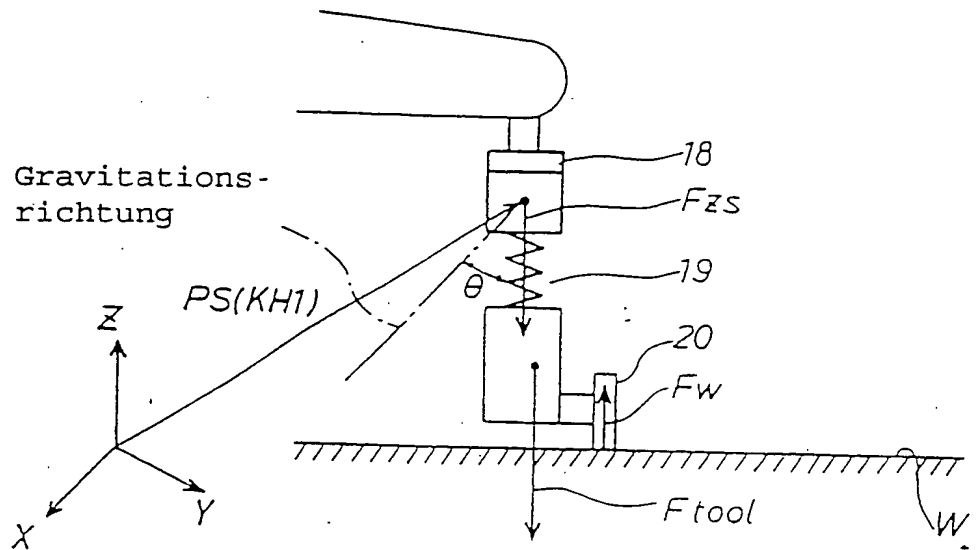
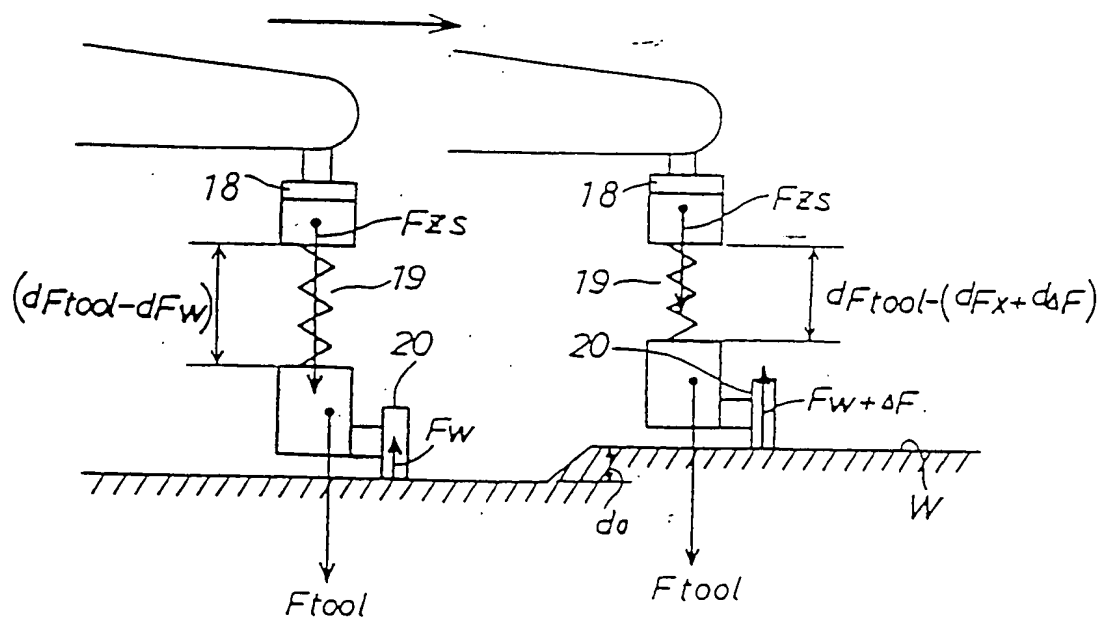
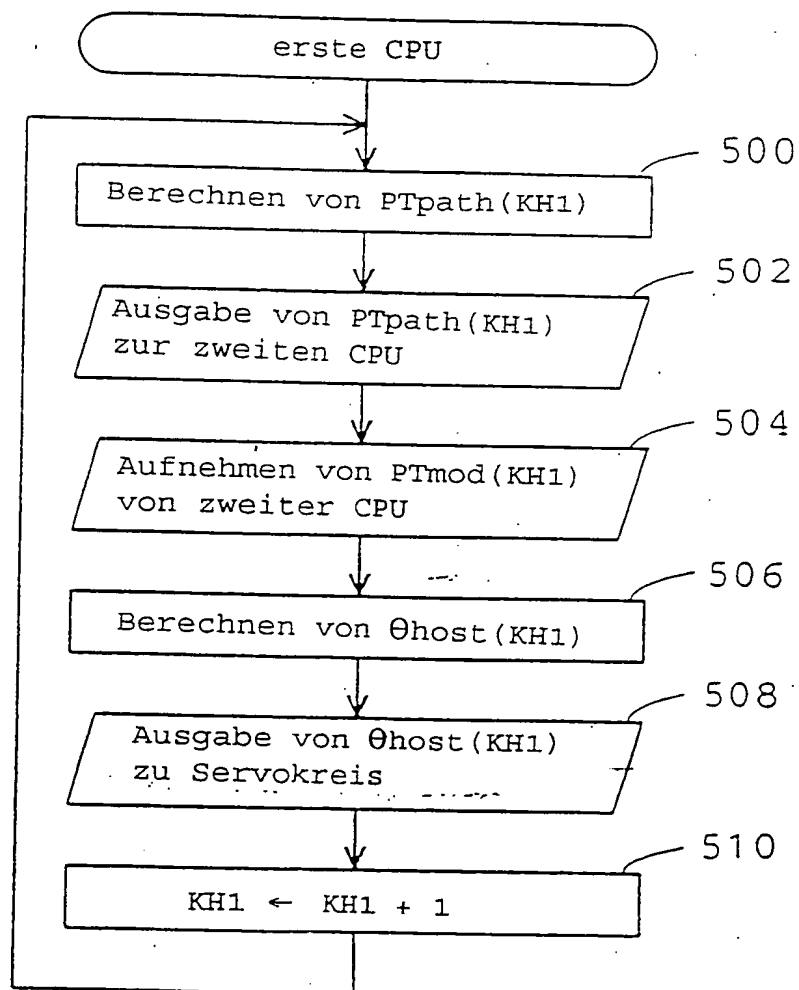


FIG. 9



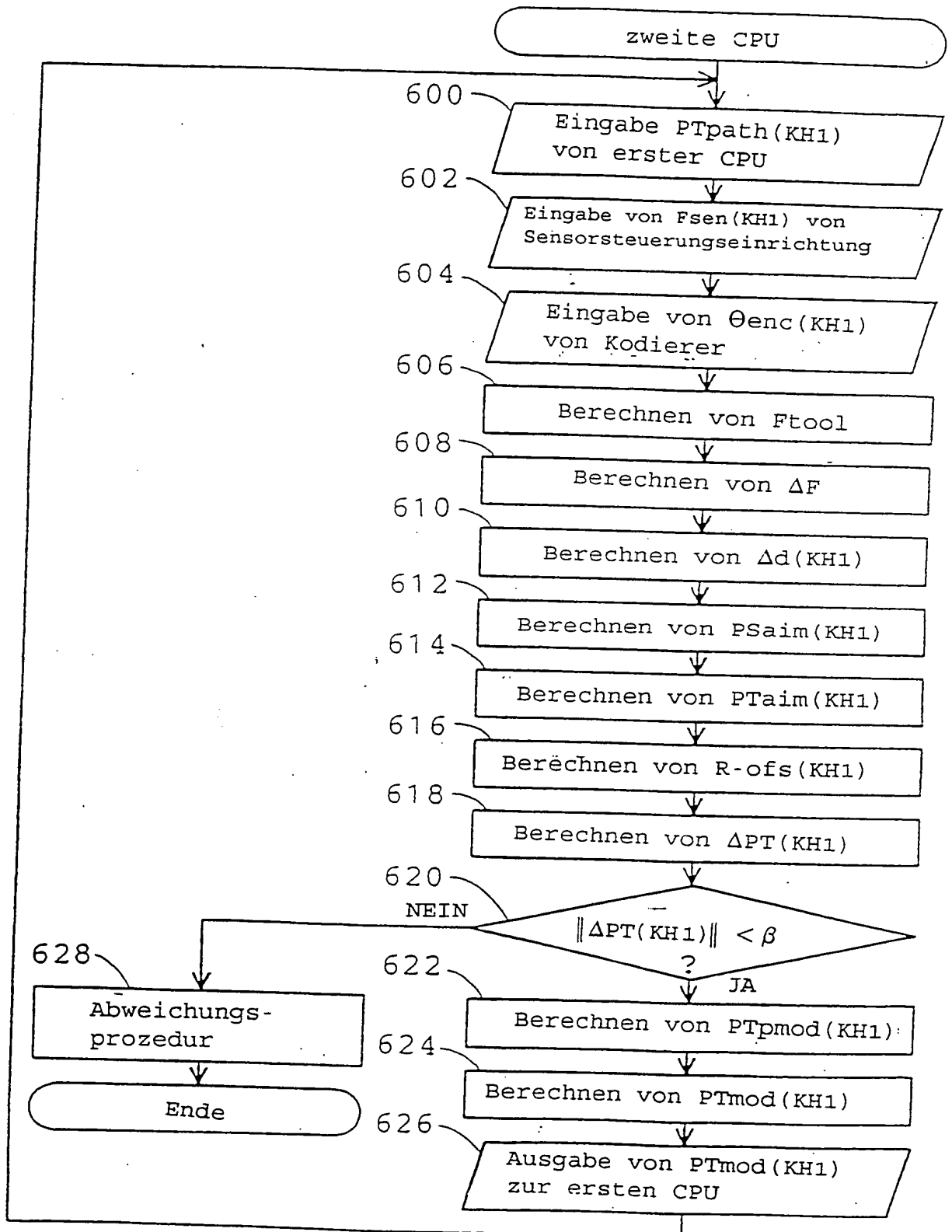
10/14

FIG. 10 :



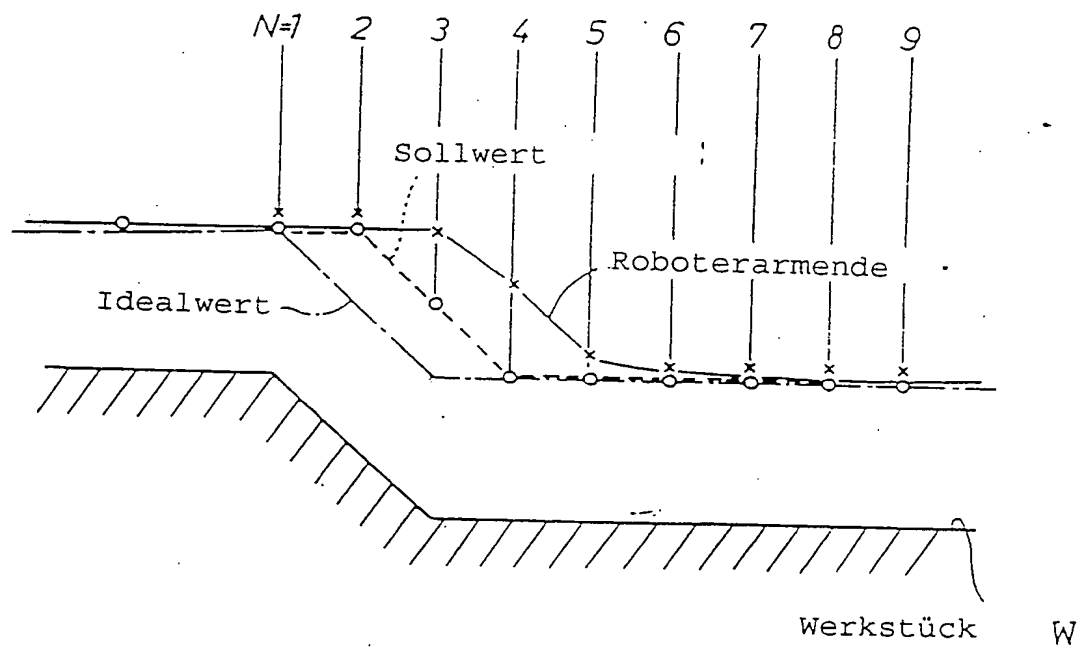
11/14

FIG. 11



12/14

FIG. 12:



13/14

FIG. 13

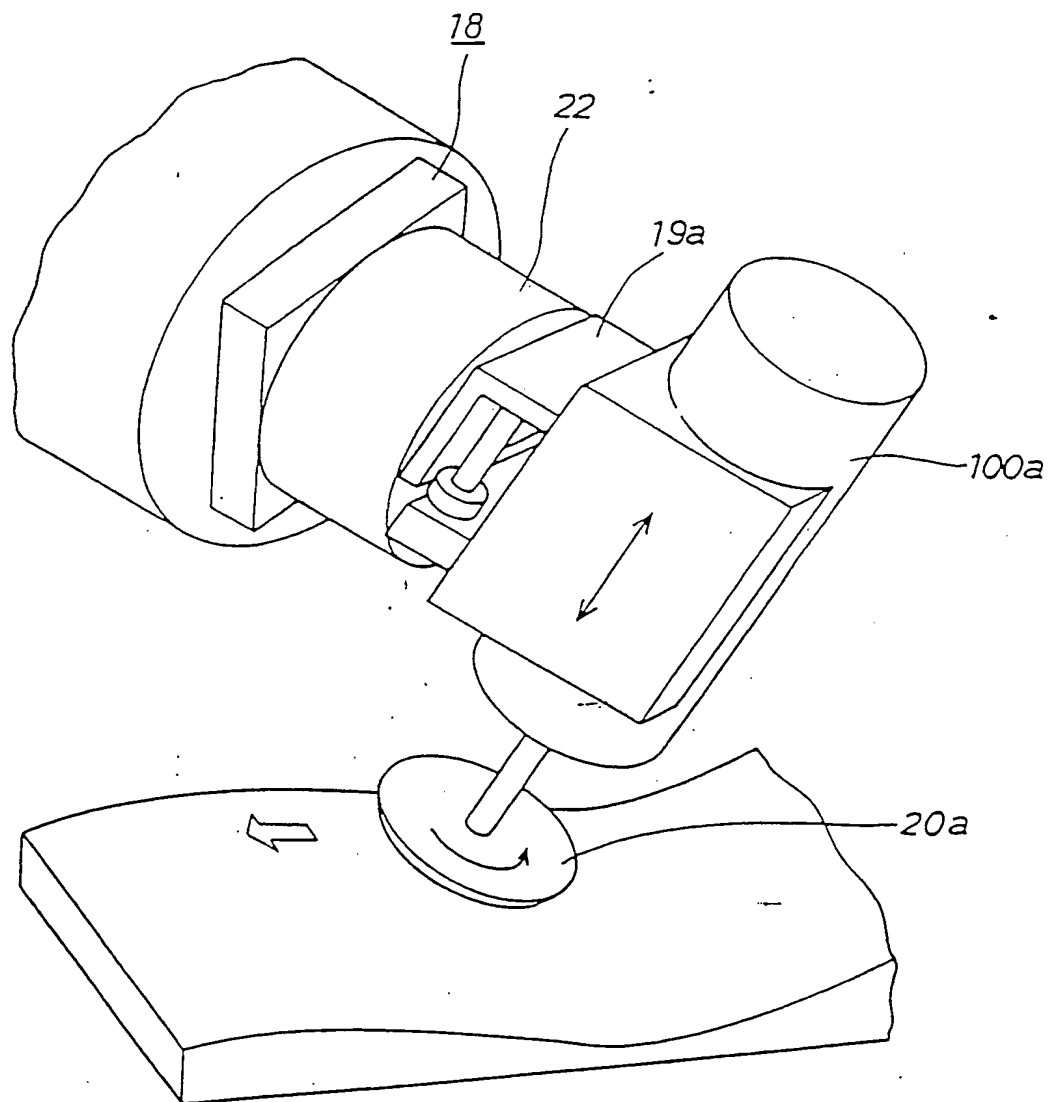


FIG. 14A

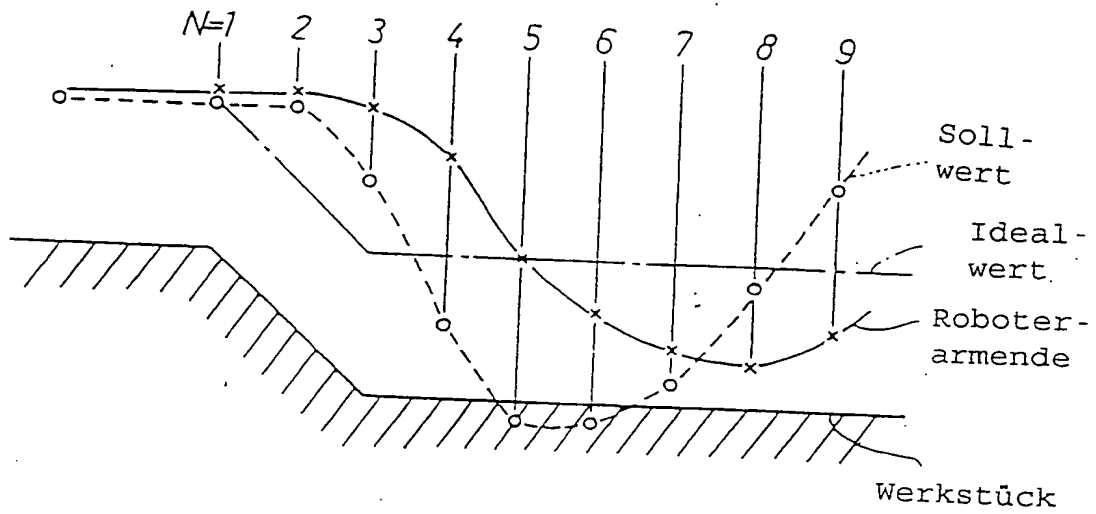


FIG. 14B

